



75 Jahre
Demokratie
lebendig



Deutscher Bundestag
Wissenschaftliche Dienste

Sachstand

Gesundheitliche Effekte von Ultrafeinstaub

Entstehung, Relevanz verschiedener Quellen und Wirkungen
auf den Menschen

Gesundheitliche Effekte von Ultrafeinstaub

Entstehung, Relevanz verschiedener Quellen und Wirkungen
auf den Menschen

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 031/24
Abschluss der Arbeit: 29.05.2024
Fachbereich: WD 8: Gesundheit, Familie, Bildung und Forschung,
Lebenswissenschaften

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.	Definition und Begriffsbestimmung von Ultrafeinstaub	4
2.	Entstehung von atmosphärischem Ultrafeinstaub	4
3.	Gesundheitliche Effekte	6
3.1.	Feinstaub	6
3.2.	Ultrafeinstaub an Flughäfen: Ergebnisse aus Einzelstudien	10

1. Definition und Begriffsbestimmung von Ultrafeinstaub

Als Ultrafeinstaub bezeichnet man menschengemachte, aber auch natürliche feste oder flüssige Partikel in der Luft, die eine Größe zwischen 1 und 100 Nanometern (Definition entsprechend DIN EN ISO 14644-3) aufweisen.¹ In einigen Studien werden ultrafeine Partikel schon ab der Größenordnung unterhalb von einem Mikrometer erfasst. Dies ist beim Vergleich von wissenschaftlichen Studien zu beachten.²

Ultrafeine Partikel sind etwa 1000-mal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares. Für das Verständnis der Exposition wie auch toxikologischer Daten ist es entscheidend zu wissen, dass Ultrafeinstaub auch Bestandteil des Feinstaubs ist, der in Deutschland in den Kategorien PM_{2,5} unterhalb 2,5 Mikrometern und PM₁₀ unterhalb 10 Mikrometern reguliert und an den bundesweit 360 Messstellen des Luftmessnetzes³ erfasst wird. Für PM_{2,5} und PM₁₀ existieren seit vielen Jahren EU-weite Grenzwerte für die Außenluft, die auf die toxikologischen Daten zurückgehen. Derzeit wird die EU-Luftqualitäts-Richtlinie (EU-RL 2008/50/EG) überarbeitet mit dem Ziel, sich künftig an den WHO-Empfehlungen zu orientieren. Diskutiert wird ein neuer EU-Grenzwert für PM_{2,5} ab 2030 von 10 Mikrogramm pro Kubikmeter im Jahresmittel.⁴

2. Entstehung von atmosphärischem Ultrafeinstaub

Anthropogener Ultrafeinstaub entsteht bei Verbrennungsvorgängen und damit im Straßen-, Schiffs- und Luftverkehr wie auch durch den Abrieb von Bremsen und Reifen und damit zusätzlich auch in geringerem Umfang im Schienenverkehr. Kraftwerke, Industrieanlagen und das Schweißen sind weitere wichtige lokale Quellen für Ultrafeinstaub im Außenraum. Weiterhin und vor allem in Innenräumen ist das Rauchen, das Kochen und Toasten wie auch das Heizen mit Holz und Abbrennen von Kerzen eine wichtige Quelle von Feinstaub, der auch einen erheblichen Anteil von Ultrafeinstaub enthält. Auch Druckgeräte und Staubsaugergeräte ohne ausrei-

1 DIN EN ISO 14644-3:2006-03 Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche; Teil 3: Prüfverfahren, deutsche Fassung EN ISO 14644-3:2005. Beuth Verlag, Berlin.

2 Birmili, Wolfram et al., Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand, 2018, In: UMID, Nr. 2, S. 57-65, abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_birmili.pdf.

3 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1093340/umfrage/anzahl-der-feinstaub-messstationen-nach-stationsumgebung-in-deutschland/#:~:text=Im%20Jahr%202023%20befanden%20sich,im%201%C3%A4ndlichen%20Raum%20gemessen%20haben.>

4 Umweltbundesamt, Indikator: Belastung der Bevölkerung durch Feinstaub (PM_{2,5}), 27.02.2024, abrufbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-belastung-der-bevoelkerung-durch-0#die-wichtigsten-fakten.](https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-belastung-der-bevoelkerung-durch-0#die-wichtigsten-fakten)

chende Filtertechnik können zur Exposition mit Ultrafeinstaub im Innenraum beitragen. Ultrafeinstaub wird über verschiedene Verfahren gemessen, indem die Anzahl der Partikel und ihre Größenverteilung erfasst wird.⁵

Generell gibt es deutlich weniger Messdaten zur Ultrafeinstaubbelastung der Außenluft verglichen mit PM 10- und PM 2,5-Daten. Im Rahmen des deutschen Messnetzes für ultrafeine Aerosolpartikel (GUAN – German Ultrafine Aerosol Network) erfassen mehrere Forschungseinrichtungen und Behörden seit 2009 die Ultrafeinstaubbelastung an 17 Stationen in Deutschland. Daraus konnten wichtige Erkenntnisse über den zeitlichen Trend und Hot Spots der Belastung gewonnen werden. Deutlich zeigt sich, dass die Ultrafeinstaubgehalte im Gebirge geringer sind als auf dem Land, gefolgt von der Stadt. Spitzenwerte werden an städtischen Verkehrsachsen mit bis zu 10.000 Partikeln je Kubikzentimeter erreicht.⁶

Neben dem Straßenverkehr ist der Flugverkehr eine wichtige Quelle für Ultrafeinstaub in städtischen Ballungsgebieten. Messungen an deutschen Flughäfen zeigen zur Tageszeit mittlere Konzentrationen an Ultrafeinstaub zwischen ca. 13.000 und 31.000 Partikel/Kubikzentimeter. Die durch den Flugbetrieb verursachten Emissionen können noch in bis zu acht Kilometern Entfernung in Windrichtung zu einer deutlichen Erhöhung der Ultrafeinstaub-Konzentration führen.⁷ Auch eine neuere Veröffentlichung auf Basis von Messungen am Flughafen Frankfurt identifiziert diesen als bedeutenden Emittenten von Ultrafeinstaub. Das 24-Stunden-Mittel der Partikel lag bei 24.000 je Kubikzentimeter.⁸ Allerdings ist der Ultrafeinstaub an Flughäfen nicht allein auf die Verbrennung von Kerosin zurückzuführen. Untersuchungen, ebenfalls am Flughafen Frankfurt, ergaben, dass diese zu einem Teil von synthetischen Turbinenschmierölen stammen, die in den Abgasstrom gelangen.⁹

5 Birmili, Wolfram et al., Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand, 2018, In: UMID, Nr. 2, S. 57-65, abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_birmili.pdf.

6 Birmili, Wolfram et al., Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand, 2018, In: UMID, Nr. 2, S. 57-65, abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_birmili.pdf.

7 Bayerisches Landesamt für Umwelt, Faktenpapier Ultrafeine Partikel, Juni 2021, S. 6, abrufbar unter https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/innovative_analysen/ultrafeine_partikel/aus_dem_verkehr/doc/faktenpapier_ultrafeine_partikel.pdf.

8 Dröge, Janis, Influence of a large commercial airport on the ultrafine particle number concentration in a distant residential area under different wind conditions and the impact of the COVID-19 pandemic, In: Environmental Pollution, Band 345, 15 March 2024, abrufbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749124001040#:~:text=An%20airport%20can%20result%20in.concentration%20showed%20high%20temporal%20variations>.

9 Ungeheuer, Florian et al., Nucleation of jet engine oil vapours is a large source of aviation-related ultrafine particles. In: Communications Earth & Environment, 2022, abrufbar unter <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00653-w>.

Das Auftreten und Vorkommen von Ultrafeinstaub ist weiterhin Gegenstand laufender Forschungen. So wird im Projekt ULTRAFLEB (Ultrafeinstaubbelastung durch Flughäfen in Berlin), die Ultrafeinstaubbelastung am Flughafen BER seit November 2020 bis 31. Mai 2025 mithilfe einer Drohne untersucht. Auftraggeber ist das Umweltbundesamt.¹⁰

Die laufenden Vorhaben können durchaus zu weiteren neuen Erkenntnissen über die Bedeutung unterschiedlicher Ultrafeinstaubquellen führen: Beispielsweise emittieren Kohlekraftwerke ersten Ergebnissen einer laufenden Erhebung zufolge in Summe mehr Ultrafeinstaub als der Verkehr. In 300 Metern Höhe über den Kraftwerksstandorten wurden Konzentrationen von bis zu 60.000 Partikeln je Kubikzentimeter Luft erreicht.¹¹

3. Gesundheitliche Effekte

3.1. Feinstaub

Ultrafeinstaub ist Bestandteil des Feinstaubes, der wiederum einen Schadstoffsummenparameter darstellt, da er viele unterschiedliche Substanzen umfasst, die in fester oder flüssiger partikulärer Form in der Luft vorkommen.¹²

Bei der Frage nach den toxikologischen Effekten des Ultrafeinstaubes sind somit zunächst die toxikologischen Daten zu den Effekten des Feinstaubes auf den Menschen aus epidemiologischen, klinischen und Tierstudien relevant. Der gesundheitsschädigende Effekt von Feinstaub ist seit mehr als einem Jahrzehnt in tausenden unterschiedlichen Studien gut und weiter mit zunehmender Evidenz belegt. Dabei ist unstrittig, dass vor allem Feinstaub der Fraktion 2,5 relevant ist, da größere Partikel nicht so tief in die Atemwege vordringen und auch leichter wieder aus dem Atemwegstrakt ausgeschleust werden können. Weiterhin halten sich Partikel der Kategorie PM 2,5 aufgrund der geringeren Masse tendenziell länger in der Luft. Sie legen längere Distanzen in der Atmosphäre zurück und werden generell leichter vom Wind verfrachtet.¹³

Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Partikel sind, desto leichter können sie vornehmlich über Inhalation, aber auch über dermalen Kontakt oder orale Aufnahme (dust-ingestion) in Zellen der Lunge, des Gehirns, des Verdauungstrakts und auch des Blutkreislaufs vordringen. Diesen Effekt macht sich im Übrigen die Nanomedizin zunutze, indem sie nanoskalige Wirkstoffsysteme ent-

10 Ultrafeinstaubbelastung durch Flughäfen in Berlin <https://www.tropos.de/forschung/grossprojekte-infrastruktur-technologie/ultrafleb#:~:text=Ultrafeinstaubbelastung%20durch%20Flugh%C3%A4fen%20in%20Berlin,2020%20und%20endet%20am%2031.>

11 Bayerisches Landesamt für Umwelt, Faktenpapier Ultrafeine Partikel, S. 7, Juni 2021, abrufbar unter https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/innovative_analysen/ultrafeine_partikel/aus_dem_verkehr/doc/faktenpapier_ultrafeine_partikel.pdf.

12 Feinstaub wird entsprechend der Partikelgröße in die Fraktion kleiner 10 Mikrometer unterteilt, die als PM 10 bezeichnet wird. Partikel kleiner 2,5 Mikrometer werden in der Kategorie PM 2,5 erfasst. Auf diese Einteilung stützt sich auch die Regulierung.

13 Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2,5})-Mediated Toxicity in Humans, S. 2, 2022, In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.

wickelt, die ihren Wirkort auch aufgrund ihrer geringen Größe im Körper gut erreichen können. Grundsätzlich unterscheiden sich Feinstaubpartikel jedoch nicht nur abhängig von der Größe in ihrer Wirkung, sondern auch entsprechend ihrer Zusammensetzung und Beladung mit anderen Schadstoffen. Studien zeigen beispielsweise, dass Partikel aus der Verbrennung in Dieselmotoren schädlichere Effekte haben als jene aus der Verbrennung anderer Kraftstofftypen. Eine neue Erhebung zeigt den deutlichen Einfluss verschiedener Metalle auf der Oberfläche von Feinstaubpartikeln. Neben der Dosis von PM 2,5 vermitteln diese anhaftenden Schadstoffe die krebsfördernde und das Herz- und Kreislaufsystem kompromittierende Wirkung.¹⁴

Seit vielen Jahren ist bekannt, dass eine zunehmende Feinstaub-Belastung der Außenluft mit einer höheren Mortalität und Morbidität verknüpft ist. In einer 2022 erschienenen Analyse modellierten Chowdhury et al., den Beitrag der globalen Luftverschmutzung mit PM 2,5 an der Sterblichkeit. Sie führten weltweit etwas mehr als 4 Millionen zusätzliche Todesfälle auf PM 2,5 zurück. Dabei ist die Energienutzung im Haushalt - oft handelt es sich um die Feuerung mit Holz im Innenraum - gerade im globalen Süden eine der wichtigsten Quellen für schädigenden Feinstaub.¹⁵

Da Feinstaub primär inhalativ aus der Luft aufgenommen wird, sind das Atemwegs- und das Herz-Kreislaufsystem vornehmlich von schädigenden Effekten betroffen. Herz, Gefäße sowie Lunge und Atemwege stellen die primären Zielorgane dar. Nichtsdestotrotz werden auch an anderen Organen und physiologischen Systemen Gesundheitseffekte beobachtet, die abhängig von der Dosis und Belastung mit Feinstaub auftreten. Beschrieben sind Schädigungen der Nieren, des reproduktiven Systems, negative Auswirkungen auf das Nervensystem, insbesondere auf das reifende und alternde Gehirn und auf den Verdauungstrakt.

Im Folgenden werden die in der Fachliteratur beschriebenen Effekte kurz zusammenfassend vorgestellt. Die schädigenden Effekte werden darauf zurückgeführt, dass der Mensch konstant Feinstaubpartikeln ausgesetzt ist und diese eine anhaltende Entzündungsreaktion im exponierten Gewebe hervorrufen. Sie induzieren weiterhin oxidativen Stress, der zur Schädigung der Zellen und ihrer Stoffwechselprozesse und auch der immunologischen Vorgänge führen kann. Mitunter

14 Goordarzi, Babak et al., Investigating PM 2,5 toxicity in highly polluted urban and industrial areas in the Middle East: human health risk assessment and spatial distribution, 2023, In: Scientific Reports, 13, 17858, abrufbar unter <https://www.nature.com/articles/s41598-023-45052-z>.

15 Chowdhury, Sourangsu et al. Global health burden of ambient PM 2,5 and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols, 2022, In: Environment International, 159, 107020, abrufbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412021006450>.

kann die Belastung mit Feinstaub auch zu Veränderungen des Genoms, des Epigenoms und damit der Art und Weise, wie das Erbgut bei der Vermehrung der Zellen abgelesen wird, führen. Eine hohe Exposition kann in Laborexperimenten an isolierten Zellen auch zum Zelltod führen.¹⁶ Thangavel et al. schicken vorweg, dass Luftverschmutzung der wichtigste umweltbedingte Auslöser für verschiedene Krankheiten sei. In ihrer aktuellen Übersichtsarbeit führen sie die toxikologischen Effekte entsprechend dem Stand der Wissenschaft aus und haben dafür 207 wissenschaftliche Studien zwischen 2010 und 2022 berücksichtigt. Die Exposition mit PM 2,5 erhöht demzufolge das Risiko von Schlaganfällen und Herzinfarkten, von Bluthochdruck und Thrombosen sowie das Risiko, an diesen Leiden zu versterben. Herzversagen und Herzrhythmusstörungen wie auch andere kardiovaskuläre Erkrankungen hängen ebenfalls mit der Menge an PM 2,5 zusammen, der Menschen ausgesetzt sind. Das kann beispielsweise über die Zeit erfasst werden, die sie täglich im Straßenverkehr verbringen, in der sie hohe Anzahlkonzentrationen an Feinstaub einatmen.¹⁷

Mit der steigenden Belastung der Außenluft mit PM 2,5 verschlechtern sich außerdem bestehende Erkrankungen, zuvorderst Asthma wie auch die Chronisch Obstruktive Lungenerkrankung. Jüngst wurde die Belastung mit PM 2,5 auch erstmalig mit dem Auftreten von Diabetes mellitus in Verbindung gebracht.¹⁸ Es gilt weiterhin als gesichert, dass PM 2,5 das Risiko für Lungenkrebs erhöht. Auch für Blasenkrebs zeigen verschiedene Studien einen vergleichbaren Zusammenhang. Für andere Krebsarten sind die Daten weniger umfassend oder eine entsprechende Assoziation zeigte sich nicht. Ganz generell stuft die Internationale Agentur der Krebsforschung (International Agency for Research on Cancer, IARC) die Luftverschmutzung der Außenluft als krebserregend ein. Dazu gehört aber nicht nur Feinstaub, sondern auch Schwefel- und Stickoxide, bodennahes Ozon, flüchtige organische Verbindungen und Kohlenmonoxid.¹⁹

PM 2,5 vermindert weiterhin das fötale Wachstum im Uterus. Je höher die Feinstaubbelastung mit PM 2,5 in der Außenluft, desto häufiger tritt statistisch bei Neugeborenen ein vermindertes Geburtsgewicht auf. Auch die Rate an Frühgeburten steigt. Die Effekte werden mit Beeinträchti-

-
- 16 Garcia, Amanda et al. Toxicological Effects of Fine Particulate Matter (PM 2,5): : Health Risks and Associated Systemic Injuries—Systematic Review, 2023, In: Water Air Soil Pollution, 234, 6: 346, abrufbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-023-06278-9> Sowie Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM 2,5)-Mediated Toxicity in Humans, 2022, In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.
 - 17 Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM 2,5)-Mediated Toxicity in Humans, S. 8, 2022, In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.
 - 18 Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM 2,5)-Mediated Toxicity in Humans, S. 7, 2022, In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.
 - 19 Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM 2,5)-Mediated Toxicity in Humans, S. 9, 2022, In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.

gungen in der Nährstoff- und Energieversorgung des Babys im Mutterleib infolge der Schadstoffbelastung erklärt. Auch die Sterblichkeit nach Geburt ist höher, wenn die Dosis von PM 2,5 in der Außenluft steigt.^{20 21}

Die Belastung mit PM 2,5 in der Umgebungsluft wird in vielen Studien mit dem Auftreten von chronischen Nierenerkrankungen in Verbindung gebracht. Auch eine abnehmende Leistungsfähigkeit der Niere konnte abhängig von der PM 2,5-Dosis gezeigt werden. Aus den bestehenden Daten wird geschätzt, dass eine Zunahme von 10 Mikrogramm PM 2,5 je Kubikmeter Luft mit einem Anstieg chronischer Nierenleiden von sechs Prozent einhergeht.²²

Die neuere Forschung richtet sich auf bisher weniger intensiv betrachtete Risiken, etwa mit steigender Feinstaubbelastung das Risiko für einen schweren Verlauf von Atemwegserkrankungen steigt. Zu den neuen Forschungsgebieten zählt genauso, dass eine hohe Feinstaubbelastung mit dem Auftreten von neurodegenerativen Erkrankungen einhergehen kann.

PM 2,5 kann über den Blutstrom und den Riechnerv das Gehirn erreichen und dort neurotoxische Effekte hervorrufen, die Gegenstand einer Reihe unterschiedlicher Studien sind. Da Ultrafeinstaub noch einmal leichter auf diesen Wegen in das Zentralnervensystem gelangen kann, ist gerade diese Forschung auch für nanoskalige Partikel von besonderer Bedeutung. Es mehren sich die Hinweise, dass die Exposition mit Feinstaub deutlich mit neurologischen Erkrankungen wie der Parkinsonschen Erkrankung, der Alzheimer Erkrankung und mit demenziellen Erkrankungen in Verbindung steht. Besonders vulnerabel könnten den bisherigen Befunden zufolge das reife Gehirn von Kindern wie auch das alternde Gehirn von Senioren sein. Feinstaub scheint die Funktion der Nervenzellen zu stören und das Immunsystem des Gehirns zu beeinträchtigen.^{23 24}

Schon im Nachgang des SARS-Ausbruchs 2002 und 2003 zeigten verschiedene Forschungsgruppen, dass die Mortalität nach einer Infektion mit dem Virus dort erhöht war, wo die PM 2,5-Belastung höher lag. Die Auswertung der Daten der Covid-19-Pandemie hat die Aufmerksamkeit auf Luftverschmutzung als Katalysator für das Infektionsrisiko von Atemwegserkrankungen deutlich erhöht. Sowohl Daten aus China, aus Italien, den Niederlanden und den USA zeigen einerseits,

-
- 20 Garcia, Amanda et al., Particulate Matter (PM 2,5): Health Risks and Associated Systemic Injuries—Systematic Review, S. 12, 2023, In: *Water Air Soil Pollution*, 234, 6: 346, abrufbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-023-06278-9>.
- 21 Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM 2,5)-Mediated Toxicity in Humans, S. 5, 2022, In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.
- 22 Particulate Matter (PM 2,5): Health Risks and Associated Systemic Injuries—Systematic Review, S. 10-11, 2023, In: *Water Air Soil Pollution*, 234, 6: 346, abrufbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-023-06278-9>.
- 23 Garcia, Amanda et al., Particulate Matter (PM 2,5): Health Risks and Associated Systemic Injuries—Systematic Review, S. 10, 2023, In: *Water Air Soil Pollution*, 234, 6: 346, abrufbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-023-06278-9>.
- 24 Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM 2,5)-Mediated Toxicity in Humans, S. 10-11, 2022, In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.

dass eine hohe PM 2,5-Belastung der Außenluft die Ansteckungsgefahr mit Covid-19 erhöht. Forschende postulieren, dass Feinstaubpartikel den Viren als Träger dienen, an die sie sich anheften und so längere Zeit in der Luft zirkulieren können. Insbesondere der drastische Verlauf der Covid-19-Pandemie im Norden Italiens wird inzwischen insbesondere auch mit der Luftverschmutzung erklärt: In Regionen mit hoher Feinstaubbelastung und Grenzwertüberschreitungen an mehr als 100 Tagen im Jahr haben sich neunmal so viele Personen infiziert verglichen mit den am wenigsten feinstaubbelasteten Zonen. Weiterhin beeinflusst die Menge an Feinstaub in der Luft auch den Krankheitsverlauf. Sowohl die kurzzeitige als auch die langzeitige Belastung mit Feinstaub geht deutlich mit dem Risiko für einen schweren Verlauf einer Covid-19-Infektion und vor allem mit dem Sterberisiko einher. In hochbelasteten Regionen war die Mortalität sowohl in den USA, den Niederlanden, Italien und China höher als in feinstaubärmeren Gegenden. Entzündungsvorgänge infolge des eingeatmeten Feinstaubes machen das Lungengewebe empfänglicher für Infektionen, ist eine der Erklärungen für das beobachtete Phänomen. Darüber hinaus erleichtern vorhandene Feinstaubpartikel im Atemwegstrakt aber wahrscheinlich auch das Anwachsen von Bakterien und Viren. Es ist für die Körperabwehr dann auch schwieriger die Krankheitserreger effektiv zu bekämpfen.^{25 26}

Innerhalb der Wissenschaft wird mithin die Hypothese diskutiert, ob gerade die besonders kleine Fraktion der Feinstaubpartikel und damit der Ultrafeinstaub hauptsächlich für die nachteiligen Gesundheitseffekte des Feinstaubes verantwortlich ist. Diese Frage ist Gegenstand weiterer Forschungen.²⁷

3.2. Ultrafeinstaub an Flughäfen: Ergebnisse aus Einzelstudien

Die Datenlage bei ultrafeinen Partikeln, die ein Bestandteil von Feinstaub sind, ist deutlich weniger umfangreich verglichen mit Feinstaub. Dies kommt auch in den Luftqualitätsrichtlinien der WHO zum Ausdruck, für die zunächst die aktuelle Studienlage ausgewertet wird: Studien zeigten zum einen kurzfristige Auswirkungen der Exposition gegenüber Ultrafeinstaub, schreibt die WHO. Die Sterblichkeit nähme zu, ebenso Einweisungen in eine Notaufnahme oder ein Krankenhaus. Atemwegsprobleme, Herzratenvariabilität und Blutdruck verschlechterten sich. Auch langfristig offenbarte sich eine erhöhte Sterblichkeit. Da die Studien jedoch insgesamt noch nicht aus-

25 Particulate Matter (PM 2,5): Health Risks and Associated Systemic Injuries—Systematic Review, S. 13-14, 2023, In: Water Air Soil Pollution, 234, 6: 346, abrufbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-023-06278-9>.

26 Thangavel, Prakash et al., Recent Insights into Particulate Matter (PM 2,5)-Mediated Toxicity in Humans, S. 12-13, 2022, In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(12), 7511, abrufbar unter <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9223652/>.

27 Birmili, Wolfram et al., Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand, 2018, In: UMID, Nr. 2, S. 57-65, abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_birmili.pdf.

reichend konsistent seien, konnten die Expertinnen und Experten noch keine Grenzwertempfehlung ableiten.²⁸ Sobald die WHO einen Richtwert empfiehlt, kann dies zur Einführung eines rechtlich verankerten Grenzwertes in der EU beitragen.

Wenn ein Schadstoff in Bevölkerungsstudien mit nachteiligen gesundheitlichen Effekten in Verbindung gebracht werden kann, stellt sich aus wissenschaftlicher Perspektive immer auch die Frage eines plausiblen Wirkmechanismus. Wie es zu einer Schädigung kommt, wird sodann in Zellkultur, auf Ebene der Gene, der Genexpression wie auch der Stoffwechselprodukte (Metabolom) untersucht. Aus entsprechenden Experimenten mit ultrafeinen Partikeln ist bisher deutlich geworden, dass ultrafeine Partikel in Zellen Entzündungsreaktionen auslösen. Sie können zu vermehrtem oxidativen Stress in der Zelle und auch zum Zelltod führen. Weiterhin können sie das Muster, wie das Genom bei der Zellteilung abgelesen wird, verändern und rufen damit auch epigenetische Effekte hervor.²⁹ Toxikologische Effekte von nanoskaligen Partikeln können auch dadurch auftreten, dass sich auf ihrer großen Oberfläche andere Schadstoffe anheften. Etwa könnten sich toxische polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dioxine oder Furane, aber auch Metalle adsorbieren und im Körpergewebe dann allmählich wieder von den Partikeln freigesetzt werden. Die Art und Weise der Wirkung ultrafeiner Partikel gleicht damit der größerer Partikel, sodass in dieser Hinsicht kein kategorischer Unterschied zwischen Ultrafeinstaub und Feinstaub erkennbar wird. Das unterstreicht einmal mehr, weshalb bei der Frage der Toxikologie von Ultrafeinstaub auch die Effekte des Feinstaubes zu betrachten sind.

Wie aber die Partikel aus Flugzeugtriebwerken für sich genommen wirken, ist nach aktueller Einschätzung der Forschung weitgehend unbekannt, da entsprechende Experimente im Labor, in denen Zellen, Tiere oder Gewebe unter kontrollierten Bedingungen Flugzeugabgaspartikeln ausgesetzt werden, herausfordernd seien. Die Forschungsgruppe der Medizinerin Marianne Geiser von der Universität Bern wies in einem ersten Experiment nachteilige Effekte von gewöhnlichem Flugbenzin auf Bronchialzellen nach - und zwar besonders jener nicht luftgetragenen Partikel, die entstehen, wenn die Flugzeuge sich noch am Boden befinden.³⁰

28 WHO World Health Organization, WHO global air quality guidelines, S. 149 f, abrufbar unter <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

29 Birmili, Wolfram et al., Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand, 2018, In: UMID, Nr. 2, S. 57-65, abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_birmili.pdf.

30 Geiser, Marianne et al., Non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines at ground-idle induce oxidative stress in bronchial cells. In: Communications Biology, Band 2, 90, 2019, abrufbar unter <https://www.nature.com/articles/s42003-019-0332-7>.

Eine amerikanische Forschungsgruppe ließ 22 Erwachsene mit mildem bis mittelgradigem Asthma in der Windfahne eines Flughafens zwei Stunden lang spazieren gehen und erfasste danach deren Lungenfunktion und bestimmte Blutparameter. Dabei detektieren sie höhere Werte des Entzündungsmarkers Interleukin-6 nach dem Spaziergang in hochgradig ultrafeinstaubhaltiger Luft des Flughafens und ein herabgesetztes Lungenvolumen.³¹

Im EU-Projekt ULTHRAS – ULtrafine particles from TRansportation – Health Assessment of Sources wird der Einfluss von Ultrafeinstaub aus dem Verkehr auf die menschliche Gesundheit und das Klima zu untersucht. Dabei wird nicht nur der Flugverkehr in den Blick genommen, sondern auch Abgase von Diesel-, Benzin- und Gasmotoren aus dem Straßenverkehr, Schiffsmotoren, Flugantriebe, ebenso der Abrieb von Bremsen und Schienenoberleitungen. Aus Messergebnissen wird eine Risikoanalyse erstellt, um herauszufinden, welche Quelle das höchste Gefährdungspotential für die menschliche Gesundheit aufweist.³² Bisher liegen keine für die Fragestellung relevanten Ergebnisse aus dem Projekt vor.

Insgesamt lässt die bisherige Forschung den Schluss zu, dass Ultrafeinstaub von Flugzeugen ähnlich toxisch ist wie jener aus dem Straßen-, Schiffs- und Schienenverkehr. Das ist das Fazit einer Literaturübersicht, die toxikologische und epidemiologische Studien über die Auswirkungen ultrafeiner Partikel, auch Nanopartikel (kleiner 100 Nanometer), bei verschiedenen Verkehrsträgern zusammenfasst. Sie berücksichtigt Nanopartikel aus Fahrzeugen, aus Schiffen, der Luftfahrt und dem Schienenverkehr (hauptsächlich der U-Bahn). Die bisherigen Daten zeigten, dass das Einatmen von im Verkehr gesammelten Nanopartikeln nicht nur negative Auswirkungen auf die Lunge hat, sondern auch auf Herz und Kreislauf wie auf das Gehirn. Allerdings haben erst wenige Studien Ultrafeinstaub aus verschiedenen Quellen verglichen.³³

Vor allem bei der Entstehung von Atemwegserkrankungen wie Lungenkrebs, der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD) und Asthma, aber auch von Herz-Kreislauf-Erkrankungen wie Herzinfarkten und Schlaganfällen kommt dem Ultrafeinstaub eine wichtige Rolle zu, urteilt der Mediziner Dean Schraufnagel von der Universität Illinois in einer aktuellen Übersichtsarbeit.³⁴ Demnach gelangen die Partikel in der Regel aus der Luft über die Lunge in den Körper, wandern aber zu fast allen Organen. Im Vergleich zu feinen Partikeln (PM 2.5) verursachen sie mehr Lungenentzündungen und verbleiben länger in der Lunge. Ihre Toxizität nimmt mit der geringeren Größe, der größeren Oberfläche, mit adsorbierten toxischen Substanzen und den physikalischen Eigenschaften der Partikel zu. Die Exposition mit ultrafeinen Partikeln löst Husten aus und verschlimmert Asthma. Das Metallrauchfieber ist Schraufnagel zufolge eine systemische

31 Habre, Rima et al., Short-term effects of airport-associated ultrafine particle exposure on lung function and inflammation in adults with asthma, 2018, In: Environment International, 118, S. 48-59, online abrufbar <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018301211>.

32 Norwegian Institute of Public Health, Ulthras, 2023, abrufbar unter <https://www.fhi.no/en/cl/studies/ulthras/>.

33 Karlsson, Hanna et al., Toxicity and health effects of ultrafine particles: Towards an understanding of the relative impacts of different transport modes. In: Environmental Research, 231, 2023, abrufbar unter <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37224945/>.

34 Schraufnagel 2020 The health effects of ultrafine particles. In: Exp Mol Med, 52(3):311-317, 2020, abrufbar unter <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32203102/#full-view-affiliation-1>.

Lungenentzündung, die höchstwahrscheinlich durch Ultrafeinstaub verursacht wird. Die Krankheit äußert sich durch systemische Symptome Stunden nach der Exposition gegenüber Metalldämpfen, in der Regel durch Schweißen. Ultrafeinstaub verursache systemische Entzündungen, endotheliale Funktionsstörungen und Gerinnungsveränderungen, die die Betroffenen für Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Bluthochdruck empfänglich machen, erläutert der Experte. Ultrafeine Partikel werden aber auch mit Diabetes und Krebs in Verbindung gebracht. Sie können weiterhin über die Geruchsnerven bis zum Gehirn vordringen und dort zerebrale und autonome Funktionsstörungen verursachen.

Ohnehin gehört zu den neueren wichtigen Forschungsfeldern die Frage, inwieweit Feinstaub und insbesondere Ultrafeinstaub neurodegenerative Krankheiten wie demenziellen Erkrankungen, die Parkinsonsche Erkrankung oder Multiple Sklerose begünstigt (siehe auch Kapitel 3.1.). „Es häufen sich die Hinweise darauf, dass die Gehirne von Stadtbewohnern hohe Konzentrationen von Nanopartikeln aus der Verbrennung enthalten, und es gibt sowohl epidemiologische als auch experimentelle Belege dafür, dass dies mit dem Auftreten neurodegenerativer menschlicher Erkrankungen zusammenhängt“³⁵, heißt es beispielsweise in einer neueren wissenschaftlichen Veröffentlichung zu der Thematik.

Eine Schwierigkeit bei der Erforschung der toxikologischen Effekte von Ultrafeinstaub besteht gleichwohl darin, dass sich in epidemiologischen Studien der Effekt der nanoskaligen Teilchen nicht leicht von der Wirkung anderer Schadstoffe wie dem größeren Feinstaub, aber auch von Stickoxiden und Ozon abgrenzen lässt. Schließlich treten die verschiedenen Luftschadstoffe immer vergesellschaftet miteinander auf. Auch müssen Ultrafeinstäube strenggenommen je nach Quelle getrennt betrachtet werden, da Ultrafeinstaub von Flughäfen anders zusammengesetzt und vor allem befrachtet ist als jener, der im Straßenverkehr entsteht.³⁶

35 Méndez-Rojas, Miguel Ángel et al. Particulate matter and ultrafine particles in urban air pollution and their effect on the nervous system. In: Environ Sci Process Impacts, 25(4), 2023, abrufbar unter <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36752881/>.

36 Birmili, Wolfram et al., Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand, 2018, In: UMID, Nr. 2, S. 57-65, abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_birmili.pdf.