WIKIPEDIA

Feinstaub

Feinstaub ist ein Teil des Schwebstaubs. Die aktuelle Definition des Feinstaubs geht zurück auf den im Jahr 1987 eingeführten *National Air Quality*-Standard for **P**articulate **M**atter (kurz als PM-Standard bezeichnet) der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency).[1] Die ursprüngliche Definition des Feinstaubs basierte auf der Johannesburger Konvention aus dem Jahr 1959 und sah als Trennkorndurchmesser einen aerodynamischen Durchmesser von 5 Mikrometer (µm) vor.[2]

Die Begriffe Aerosol und Feinstaub werden meist gleichbedeutend verwendet.[3]

Nach der Richtlinie der WHO zur Luftreinhaltung (WHO global air quality guidelines) ist Luftverschmutzung global der Umweltfaktor mit der größten Bedrohung der menschlichen Gesundheit. Feinstaub schädigt weltweit mehr Menschen als irgendein anderer Luftschadstoff.[4][5] Die 2013 veröffentlichte Studie *ESCAPE*, die Gesundheit und Umgebungsbedingungen von 312.944 Europäern in neun Ländern verfolgte, zeigte für jede zusätzliche Belastung der Atemluft mit 10 µg/m³ eine Erhöhung des Risikos, an Lungenkrebs zu erkranken, von 22 % für Partikel der Kategorie PM_{10} und 36 % für Partikel der Kategorie $PM_{2,5}$.[6]

Inhaltsverzeichnis

Kategorisierung
- PM_{10}
- $PM_{2,5}$
- „Ultrafeinstaub“
- Wissenschaftliche Diskussion

Wirkungen auf die Gesundheit
- Bestimmte inhalierbare Stäube und ihre Krankheiten
- Bestimmte Krankheitsbefunde durch Feinstaub
- Grenzwerte und Diskussion
- Arbeitsschutz
- Ergebnisse aus der Grundlagenforschung

Wirkung auf Wetter und Klima

Entstehung
- Hauptverursacher und Art der Quellen
- Situation in Deutschland
  - Böllerverbot
  - Hausheizung
  - Beseitigung pflanzlicher Abfälle durch Verbrennen
  - Schadstoffemissionsregister

Situation in der Schweiz

Reduktion
Europäische Union
Deutschland
Schweiz
Feinstaubreduktion in Innenräumen
Andere Länder
WHO

Physikalische Eigenschaften
Feinstaubtransport mit der Luft
Korngrößenverteilung und Koagulation

Recht
Europäische Union
Schweiz
USA

Messtechnische Erfassung von Feinstaub

Siehe auch

Literatur

Weblinks

Einzelnachweise

Kategorisierung

Die mit dem US-Standard eingeführte PM-Kategorisierung stellt eine grundlegende Veränderung in der Bewertung von Immissionen dar: Während zuvor die Gesamtimmission betrachtet wurde, liegt der Fokus nun auf dem einatembaren Anteil der Immissionen. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass feine Partikel von den Schleimhäuten im Nasenrachenraum bzw. den Härchen im Nasenbereich nur teilweise zurückgehalten werden, während gröbere Partikel keine Belastung der Atemwege darstellen, daher wird im Zusammenhang mit Feinstaub auch von inhalierbarem Feinstaub bzw. als thorakalem Schwebstaub gesprochen.

Der Feinstaub wird dabei in Kategorien eingeteilt, die nach dem maximalen Teilchendurchmesser definiert sind. PM_{10} steht dabei beispielsweise für alle Teilchen mit einem maximalen Durchmesser von bis zu 10 µm. In dieser Kategorie sind also alle Teilchen mit kleineren Durchmessern auch enthalten.[7]

PM_{10}

In der ersten Fassung der amerikanischen Richtlinie wurde der Standard PM_{10} definiert, für den seit Anfang 2005 auch in der EU ein Grenzwert einzuhalten ist. Im Gegensatz zu der üblicherweise genannten Definition stellt PM_{10} keine scharfe Aufteilung der Immissionen bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 Mikrometern (10 µm) dar; vielmehr wurde versucht, das Abscheideverhalten der oberen Atemwege nachzubilden: Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 1 µm werden vollständig einbezogen, bei größeren Partikeln wird ein gewisser Prozentsatz gewertet, der mit zunehmender Partikelgröße abnimmt und bei ca. 15 µm schließlich 0 % erreicht. Technisch gesehen

entspricht dies der Anwendung einer Gewichtungsfunktion (in der Fachsprache Trennkurve bzw. Trennfunktion) auf die Immissionen (in der Praxis wird dies durch einen größenselektiven Einlass an den Messgeräten erreicht). Aus dem Verlauf dieser Gewichtungsfunktion leitet sich letztendlich auch die Bezeichnung PM_{10} ab, da bei ca. 10 µm genau die Hälfte der Partikel in die Gewichtung eingehen.

$PM_{2,5}$

Im Jahr 1997 wurde die amerikanische Richtlinie um $PM_{2,5}$ ergänzt, die dem lungengängigen (alveolengängigen) Feinstaub (auch Feinststaub genannt) entspricht. Die Definition ist analog zu PM_{10}, allerdings ist die Gewichtungsfunktion wesentlich steiler (100 % Gewichtung < 0,5 µm; 0 % Gewichtung > 3,5 µm; 50 % Gewichtung bei ca. 2,5 µm). Diese wesentlich schärfere Trennung lässt sich bei der Messung nicht mehr durch einen speziellen Einlass erreichen, hierfür kommen in der Praxis Impaktoren oder Zyklone zum Einsatz.

„Ultrafeinstaub“

→ *Hauptartikel: Ultrafeinstaub*

Darüber hinaus werden ultrafeine Partikel (UP bzw. UFP, „Ultrafeinstaub“) als Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 0,1 µm definiert.[8] Der aerodynamische Durchmesser beschreibt ein kugelförmiges Partikel mit einem identischen Diffusionsverhalten wie das betrachtete Partikel.[9]

Wissenschaftliche Diskussion

Glasfaserstreifen zur Erfassung von Feinstaub mittels Einzelproben

Neben dem PM-Standard, der nach Partikelgröße einteilt, kann man Stäube auch nach Beschaffenheit, Herkunft oder anderen Kriterien einteilen. Während also bei PM die von der Größe abhängige Wirksamkeit im Vordergrund steht, schlüsseln andere Modelle etwa unter dem Aspekt der stofflichen und strukturellen Toxizität oder nach dem Verursacher auf. Eine hinreichend vollständige Betrachtung lässt sich nur unter Einbeziehung mehrerer Modelle erreichen. Ein rein auf einem PM-basierendes Erfassungs- und Auswertekonzept wäre damit prinzipbedingt mindestens unvollständig (und/oder irreführend); ebenso jegliche Diskussion, die sich rein auf den Begriff des Feinstaubs beschränkt, während es um die Diskussion von Luftschadstoffen bzw. um Luftreinhaltung geht.

Ein generelles Problem der Feinstaub-Bewertung steckt demnach in den verwendeten Messmethoden, die oftmals die Masse der gesammelten Partikel bemühen und stark vom Feuchtegehalt der Partikel je nach Wetterlage beeinflusst werden können. Weiterhin finden sich bei den üblichen Messmethoden oftmals Abweichungen im Bereich bis zu 30 %, und manchmal sogar bis zu 50 %. Diese Abweichungen lassen sich zunächst dadurch vermeiden, dass nur die Trockenmasse des Feinstaubs ermittelt wird, was wiederum die Wirkung in der Luft je nach Kondensation vernachlässigt. Die Wirkung der Kondensation und Zusammenballung von Teilchen ist umso größer, je kleiner die einzelnen Teilchen sind. Dies ist der Grund

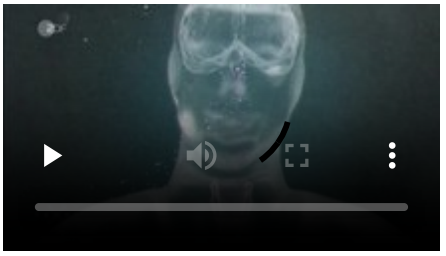
für die Erweiterung der Messverfahren von PM_{10} auf $PM_{2,5}$. Eine qualitative Analyse setzt eine Mindestmasse an Probensubstanz voraus. Die Erfassungsmethode ist entsprechend anzupassen, in der Regel durch die Erhöhung des Gesamtprobenvolumens.

Wirkungen auf die Gesundheit

Die schädigende Wirkung von Feinstaub sieht die WHO vor allem im Hinblick auf Infektionen der unteren Atemwege (ICD-10 J15-J22), chronisch-obstruktive Lungenerkrankung (ICD-10 J 44), Lungenkrebs (ICD-10 C34) und Herz-Kreislauf-Erkrankungen (ICD-10 I10, I20, I26, I30 und weitere). Betroffen sind vor allem die Einwohner von Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen. Hier findet man die höchste Belastung der Außenluft in den schnell wachsenden Großstädten. In ländlichen Regionen stellt die Belastung der Innenluft meist das größere Problem dar. Basierend auf statistischen Berechnungen des IIASA nimmt die EU im Jahr 2015 250 Millionen verlorene Lebensjahre aufgrund der Exposition gegenüber $PM_{2,5}$ an, was einer durchschnittlichen statistischen Verkürzung der Lebenszeit von 6 bis 7 Monaten entspricht.[10][11]

In weiten Teilen der Welt wird mit Brennstoffen aus Biomasse an offenen Feuerstellen geheizt und gekocht. Der dabei entstehende Rauch in den Unterkünften stellt eine sehr ernste Gesundheitsbelastung dar.[4] In Ruanda wird beispielsweise versucht, durch Einführung effizienter Öfen einerseits die Belastung der Raumluft und andererseits die Entwaldung zu vermindern.[12]

Während die gesundheitsschädigende Wirkung von Luftverschmutzung eindeutig nachzuweisen ist, gelingt dieser Nachweis für den Feinstaub alleine nur schwierig, da er meistens zusammen mit anderen Luftschadstoffen auftritt. Hier sind vor allem Ozon und Stickstoffdioxid zu nennen. Alle haben eine gemeinsame Wirkung und verstärken sich gegenseitig.[13]



Video: Feinstaubbelastung und die Folgen

Die Korngröße von Staub entscheidet darüber, wo er mit dem menschlichen Körper in Kontakt tritt. Schwebstaub mit einer Partikelgröße von > 30 µm wird beim Einatmen auf der Schleimhaut in Mund und Nase abgeschieden. Je kleiner Partikel sind, desto tiefer können sie in die Atemwege gelangen. Die Lunge erreichen Stäube mit einer Größe < 10 µm, mit einer Größe <2,5 µm geraten sie in die Lungenbläschen. Ultrafeine Partikel mit einer Größe <0,1 µm durchdringen die Wand der Lungenbläschen und sind im Blutstrom zu finden.[14]

Die biologische Wirkung von Feinstaub hängt nicht alleine von der Partikelgröße ab. Ein wichtiger Faktor ist seine chemische Zusammensetzung und damit seine Toxizität. Etwa 20 % gelten als hoch toxisch. Hierbei handelt es sich in erster Linie um die Produkte unvollständiger Verbrennung aus Motoren, Industrie und Hausbrand. Bei 80 % des Feinstaubs ist das Gesundheitsrisiko niedriger. Dies gilt für den Feinstaub aus natürlichen Quellen (Wüsten, Vulkanausbrüche), aber auch für den aus Reifenabrieb.[15]

Bestimmte inhalierbare Stäube und ihre Krankheiten

Zigarettenrauch enthält das Millionenfache an Feinstaub als der aktuelle EU-Grenzwert und schädigt in Innenräumen auch Nichtraucher.[16] Daneben sind im Tabakrauch noch zahlreiche andere gesundheitsschädliche Substanzen enthalten.[17] Zigarettenrauchen führt in Deutschland jährlich zu mehr

Todesfällen als Aids, Alkohol, illegale Drogen, Verkehrsunfälle, Morde und Selbstmorde zusammen. Die häufigsten durch Rauchen ausgelöste Krankheiten sind die chronisch-obstruktive Lungenerkrankung (ICD-10 J 44), Lungenkrebs (ICD-10 C34) und Herz-Kreislauf-Erkrankungen (ICD-10 I10, I20, I26, I30 und weitere).[18]

Krankheitserreger benutzen Feinstaub als Vehikel in die Atemwege. Aerosole, die beim Niesen und Husten, aber auch bei lautem Sprechen oder Singen erzeugt werden, sind häufig mit Viren und Bakterien beladen. Feinstäube aus organischem Material beherbergen oft Pilze und Parasiten. Bekommt das Immunsystem die Erreger nicht unter Kontrolle, entsteht eine Infektionen der unteren Atemwege (ICD-10 J15-J22). Für Lungenentzündungen ist dieser aerogene Infektionsweg bei weitem der häufigste. In diesem Zusammenhang wird oft der Begriff Tröpfcheninfektion verwendet.[19]

Mineralische Stäube lösen seit alters her vor allem bei beruflich exponierten Personen das Krankheitsbild der Staublunge oder Pneumokoniose (ICD-10, J60-63) aus. So wird diese Lungenerkrankung bereits auf einem 3500 Jahre alten ägyptischen Papyrus als Berufskrankheit der Steinmetze erwähnt. Stäube, die Kieselsäure, sogenannte **Silikate**, wie z. B. Quarz enthalten, führen zu der bekanntesten Form, der Lungensilikose (ICD-10, J62).[20] **Asbest** kann als eingeatmeter Staub sowohl eine Staublunge (Asbestose, ICD-10, J61), als auch eine Krebserkrankung des Brustfells auslösen, das sogenannte Pleuramesotheliom (ICD-10 C45.0). Dies ist seit 1930 bekannt. 1993 wurde die Verwendung von Asbest in Deutschland verboten, seit 2005 in der EU.[21] **Kohlenstaub** ist in Bergwerken der Verursacher der Anthrakose (ICD-10, J60). Weitere mineralische Stäube, können eine Staublunge auslösen, wenn sie eines der folgenden Mineralien enthalten: Talkum (ICD-10 J62.0), Aluminium (ICD-10, J63.0), Bauxit (ICD-10, J63.1), Beryllium (ICD-10, J63.2), Graphit (ICD-10, J63.3), Eisenerz (ICD-10, J63,4) und Zinn (ICD-10, J63.5).[22]

Pollen sind die männlichen Keimzellen von Blütenpflanzen. Sie können eine Größe von 8 µm bis 250 µm haben. Lungengängig sind also nur die kleineren. Dabei handelt es sich in der Regel um die Pollen von Windbestäubern, denn diese sind darauf angewiesen, dass ihre Pollenkörner lange in der Luft schweben. Hierzu zählen unter anderem Gräser, Bäume und Getreide.[23] Gelangen Pollen auf die Schleimhäute der Atemwege, können sie bei Menschen mit entsprechender Veranlagung allergische Reaktionen auslösen. Diese äußern sich als Heuschnupfen (ICD-10 J30.1) oder als allergisches Asthma bronchiale (ICD-10 J45.0).[24]

Schimmelpilzsporen sind Zellen, die von den Pilzen zum Zweck der Vermehrung abgegeben werden. Sie haben eine Größe von 2-30 µm und sind damit lungengängig, also Teil des Feinstaubs. Schimmelpilze sind in der Natur weit verbreitet, ihre Sporen allgegenwärtig. In Deutschland erreicht ihre Konzentration in der Außenluft ihr jahreszeitliches Maximum im August. Auch Innenräume können stark belastet sein, vor allem beim Umgang mit Heu und Stroh in der Landwirtschaft. In Wohnräumen kommen als Quellen feuchte Bauteile und Einrichtungsgegenstände, aber auch Zimmerpflanzen in Frage. Wie Pollen können Schimmelpilzsporen allergische Reaktionen der Schleimhäute im Bereich der Atemwege auslösen, in Form von Heuschnupfen (ICD-10 J30.1) oder allergischem Asthma bronchiale (ICD-10 J45.0).[25] Gerade in der Landwirtschaft ist auch die Farmerlunge bekannt. Hierbei kommt es zu einer entzündlichen Veränderung der Lungenbläschen (exogen-allergische Alveolitis, ICD-10 J67.0).[26] Bei Menschen mit Vorerkrankungen können Schimmelpilzsporen auch zu Infektionen der Lunge führen (z. B. Invasive Aspergillose der Lunge ICD-10 B44.0).[27]

Holzstaub entsteht bei der Bearbeitung von entsprechenden Werkstücken. Sofern es sich um lungengängige Partikel handelt, besteht hier das Risiko der Allergisierung und der Entstehung oder Verschlechterung von Asthma bronchiale (ICD-10 J45.0). Größere Partikel, die in der Nase abgeschieden werden, können dort ein Adenokarzinom der Nasennebenhöhlen (ICD-10 C31) verursachen.[28]

Bestimmte Krankheitsbefunde durch Feinstaub

Zu den Auswirkungen zählen die Verstärkung von Allergiesymptomen, die Zunahme von asthmatischen Anfällen[29] sowie ein gesteigertes Risiko von Mittelohrentzündungen[30] bei Kindern. Im Rahmen einer Metaanalyse wurde ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Feinstaubexposition und Geburtsgewicht festgestellt. Mütter, die während der Schwangerschaft hohen Feinstaubkonzentrationen ausgesetzt waren brachten kleinere Kinder zur Welt.[31] Eine Metastudie zeigt, dass bereits Konzentrationen unterhalb der geltenden EU-Grenzwerte gefährlich sind und zu Lungenkrebs, vor allem Adenokarzinomen, führen können.[32]

Eine Wirkung auf das Nervensystem wurde seit 2009 angenommen[33]. 2018 zeigte eine Untersuchung einen Zusammenhang zwischen Feinstaub ($PM_{2,5}$) sowie Ozon (O_3) und Alzheimer-Krankheit. Dabei wurden 203 Bewohner von Mexiko-Stadt untersucht. Es wurde u. a. die Häufigkeit von Tauopathien und Beta-Amyloid untersucht. Die Exposition gegenüber Feinstaub und Ozon über den USEPA-Grenzwerten kann der Studie zufolge mit einem erhöhten Alzheimer-Risiko in Verbindung gebracht werden.[34]

Eine 2023 im British Medical Journal („BMJ“) veröffentlichte Analyse von 16 Studien ergab, dass Feinstaub das Risiko für Demenzerkrankungen erhöht. Sogar Partikel-Konzentrationen deutlich unterhalb der in der EU geltenden Grenzwerte steigern hiernach deutlich die Erkrankungsgefahr.[35][36]

Eine Studie über die gesundheitliche Auswirkung von Luftverschmutzung zeigte eine führende Rolle für Feinstaub PM 2,5 bei der Entstehung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen und deren Rezidiven. 285009 ursprünglich gesunde Teilnehmer wurden über einen Zeitraum von 12 Jahren beobachtet. Es zeigte sich eine signifikante Assoziation zwischen der Exposition gegenüber Feinstaub PM 2,5 und dem Auftreten von den Herz-Kreislauf-Erkrankungen koronare Herzerkrankung, Vorhofflimmern, zerebro-vaskuläre Insuffizienz und Herzinsuffizienz.[37]

Grenzwerte und Diskussion

Im Amtsblatt der Europäischen Union werden in der *Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa* die zulässigen Grenzwerte für Luftschadstoffe festgelegt. Für PM_{10} findet sich im Anhang XI der Richtlinie folgende Regelung:

Der Tagesmittelwert für PM_{10} darf die Konzentration von 50 µg/m³ Luft je Messstelle an nicht mehr als 35 Tagen im Jahr überschreiten.[38]

Der über ein Kalenderjahr gemittelte Wert für PM_{10} darf die Konzentration von 40 µg/m³ Luft nicht überschreiten.[39]

Der Grenzwert für $PM_{2,5}$ ist in der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) geregelt. Danach beträgt der über ein Kalenderjahr gemittelte Zielwert für $PM_{2,5}$ 25 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft.[40]

Im Jahr 2019 wurden Zweifel an der Schädlichkeit von Feinstaub (und Stickstoffverbindungen) von 112 Lungenfachärzten[41] geäußert.[42] Insbesondere sahen die unterzeichnenden Ärzte „derzeit keine wissenschaftliche Begründung für die aktuellen Grenzwerte für Feinstaub und NOx“.[43] Sie kritisierten, dass die bisher verwendeten Daten „extrem einseitig interpretiert wurden, immer mit der Zielvorstellung, dass Feinstaub und NOx schädlich sein müssen. Andere Interpretationen der Daten sind aber möglich, wenn nicht viel wahrscheinlicher.“[44]

Bereits im November 2018 legte hingegen die Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin ein Positionspapier vor, in dem ausführlich auf nachgewiesene gesundheitliche Auswirkungen von Luftschadstoffen auf den Atemtrakt, das Herz-Kreislauf-System, den Stoffwechsel, den Fötus in der Schwangerschaft sowie potentiell auch auf die neurologische Entwicklung in Kindheit und Alter eingegangen wird. Eine der Schlussfolgerungen der Autoren: „Negative Gesundheitseffekte treten auch unterhalb der derzeit in Deutschland gültigen europäischen Grenzwerte auf. Bisher konnte für die wissenschaftlich gut untersuchten Schadstoffe keine Wirkungsschwelle identifiziert werden, unterhalb derer die Gefährdung der Gesundheit ausgeschlossen ist.“ Das Risiko durch Exposition sei somit so gering wie möglich zu halten.[45]

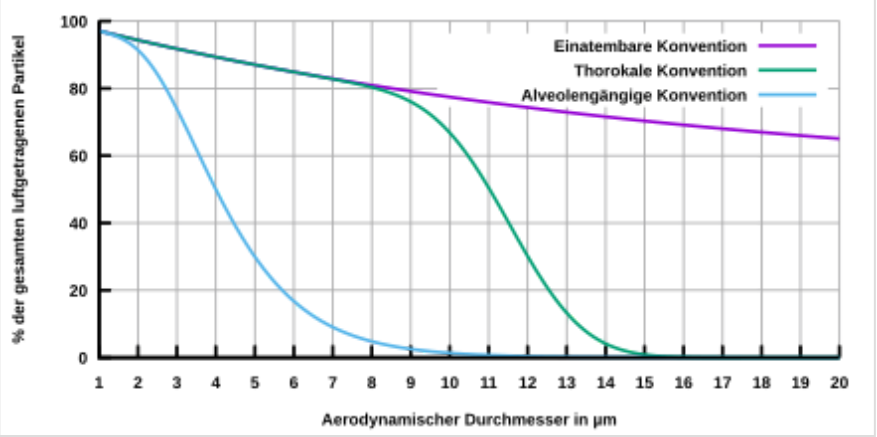
Als Reaktion auf die Veröffentlichung der Lungenfachärzte und die darauf folgende mediale Resonanz machte auch die Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) in einer ausführlichen Stellungnahme deutlich, dass die gesundheitsschädliche Wirkung von Luftschadstoffen durch neuere Studien bereits unterhalb der bestehenden Grenzwerte nachgewiesen sei.[46]

Eine aktuelle Bewertung der Gesundheitsauswirkungen von Feinstaub durch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat gezeigt, dass eine erhöhte $PM_{2,5}$-Belastung in Zusammenhang mit schweren Gesundheitsauswirkungen (z. B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen) steht. Von der EU-Kommission wurden daher 2015 Höchstwerte für $PM_{2,5}$ von 25 µg/m³ im Rahmen des Programms „Saubere Luft für Europa“ festgesetzt.[47] Beim Feinstaub soll laut der WHO die Langzeitbelastung mit kleinen Partikeln ($PM_{2,5}$) bei höchstens 5 µg/m³ liegen.[48]

Arbeitsschutz

→ Hauptartikel: A-Staub und E-Staub

Im Bereich Arbeitsschutz wird Feinstaub als Teil der Gesamtstaubbelastung betrachtet, die, in Deutschland nach den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), wie andere Gefahrstoffe, festgelegt und überwacht wird. Zur Messung der Staubbelastung sollen Messgeräte eingesetzt werden, die der DIN EN 481 entsprechen. Diese Norm legt Konventionen für die Staubfraktionen alveolengängigen Fraktion, thorakalen Fraktion sowie



Konventionswerte für einatembare Fraktion, thorakale Fraktion und alveolengängige Fraktion als Funktion des aerodynamischen Durchmessers gemäß DIN EN 481

einatembaren Fraktion fest.[49] Die Konvention für die thorakale Fraktion entspricht dabei im Wesentlichen der Konventionen der PM_{10}-Partikelfraktion aus dem Umweltschutz, während die Konvention der alveolengängigen Fraktion zwischen PM10 und PM2,5 liegt.[50]

Falls für einen Stoff nichts anderes explizit festgelegt worden ist, gilt, wie in der *TRGS 900* definiert, seit 14. Februar 2014 der allgemeine Staubgrenzwert, der für A-Staub (Alveolengängige Fraktion) bei 1,25 mg/m^3 und für E-Staub (Einatembare Fraktion) bei 10 mg/m^3 liegt.[51]

In die von der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe geführten Liste der MAK-Werte wurde Feinstaub, basierend auf der Johannesburger Konvention, Anfang der 1970er-Jahre aufgenommen.[52]

Ergebnisse aus der Grundlagenforschung

Ergebnisse aus der Grundlagenforschung dienen in der Medizin als Hinweis für Forschende im klinischen Bereich. Sie können nicht unmittelbar auf den Menschen bezogen werden.

- Wenn Feinstaub gleichzeitig organische Verbindungen und Eisen enthält, bilden sich in der Atmosphäre durch die Einwirkung von Sonnenlicht sogenannte Sauerstoffradikale. Diese sind bekannt dafür, dass sie im Körper Entzündungen auslösen. Möglicherweise ist dies eine Erklärung für die schädigende Wirkung von Feinstaub. Diese Mischung aus organischen Verbindungen und Eisen kommen bei ganz verschiedenen Feinstaub-Quellen vor, auch natürlichen. Das betrifft auch Staub aus Wüsten oder Vulkanen. Die Forschenden vermuten, dass der größte Teil aller Feinstäube mit Sauerstoffradikalen beladen ist.[53]
- Chlorid-haltiger Feinstaub, wie er aus Streusalz oder Meersalz durch Gischt entsteht, reagiert mit Stickoxiden aus Verbrennungsmotoren. Das Produkt Nitrylchlorid (NO_2Cl) wird unter dem Einfluss von Sonnenlicht wiederum zu freien Sauerstoffradikalen gespalten, die die Bildung von Ozon fördern. Dieser Effekt ist sowohl in küstennahen Großstädten wie auch in Ballungszentren im Winter beobachtet worden.[54][55]
- Drucker und Kopierer emittieren Feinstaub, der schwarze Farbe (Toner) enthalten kann. Es gibt Modellversuche, die darauf hindeuten, dass Toner (der allerdings nicht einheitlich zusammengesetzt ist) ein besonderes gentoxisches Potential haben kann.[56] Eindeutige Belege für eine Schädigung von Menschen stehen derzeit aus. Das Bundesinstitut für Risikobewertung empfiehlt die Verwendung von Geräten mit dem Blauen Engel.[57]

Wirkung auf Wetter und Klima

Informationen dazu finden sich im

→ *Hauptartikel: Aerosol*

Entstehung

Hauptverursacher und Art der Quellen

Feinstaub kann sowohl aus natürlichen wie auch aus anthropogenen (menschlichen) Quellen stammen.[58] Welche Quelle an welchem Ort dominiert, hängt von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten ab.

In der Literatur wird oft zwischen primärem und sekundärem Feinstaub unterschieden. Bei ersterem entsteht der Feinstaub direkt an seiner Quelle. Der sekundäre Feinstaub bildet sich aus chemischen Reaktionen von Gasen wie Schwefel- und Stickstoffoxiden, Ammoniak oder Kohlenwasserstoffen in der Atmosphäre.[59]

Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen: Messcontainer in Emden zur Messung der Hintergrundkonzentration

Natürliche Quellen:

- Die Erosion von Gesteinen (hauptsächlich durch Wasser und Wind) samt folgender Deflation, beispielsweise Sahara-Staub
- Kleinstlebewesen, z. B. Pilzsporen
- Partikelneubildung aus Vorläufern in der Atmosphäre
- Pflanzen (Pollen vieler Pflanzen können Allergien auslösen; siehe auch Pollenflugkalender)
- Seesalz durch Gischt und Trocknung: Bei Messungen im Jahr 2004 auf der Nordseeinsel Norderney stellten Seesalze im Jahresdurchschnitt einen Anteil von 4,7 Mikrogramm Seesalz pro Kubikmeter Luft (µg/m³) am gesamten Feinstaub der Kategorie PM_{10}. Dabei schwankten die Tageswerte erheblich zwischen 0,4 und 24,9 µg/m³. Die prozentualen Anteile am Gesamt PM_{10} lagen zwischen 1 % und 90 %. Die maximale Tagesdurchschnittskonzentration von 50 µg/m³ wurde hochgerechnet an 11 Tagen im Jahr überschritten.[60]
- Vulkanausbrüche (jährlich schätzungsweise 85 Millionen Tonnen Asche und Staub mit Partikelgröße bis 5 µm).[61] Nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010 wurde auch die Wirkung von Staub aus Vulkanen näher untersucht. Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation und britischer Fachverbände sind Gesundheitsbeeinträchtigungen nicht ganz auszuschließen: Vulkanasche enthält Spuren gesundheitlich bedenklicher Substanzen wie Fluoride oder Schwefelsäure und kann auch allergen und allein durch ihren mineralischen Charakter reizend wirken.[62]
- Busch- und Waldbrände

Nach der Richtlinie 1999/30/EG des Rates gemäß Artikel 5(4) entfällt die Verpflichtung zur Durchführung von Maßnahmeplänen gemäß Artikel 8 Absatz 3 der Richtlinie 96/62/EG, wenn PM10-Grenzwerte durch PM10-Konzentrationen in der Luft infolge von Naturereignissen überschritten werden.[63][64]

Nach Richtlinie 2008/50/EG des Rates, Kapitel III, Artikel 20 sind bei Grenzwertüberschreitungen Emissionsbeiträge aus natürlichen Quellen nicht anzurechnen. Es sind Nachweise dafür vorzulegen, dass die Quellen natürlichen Ursprungs sind.[65]

Anthropogene Quellen:

- Die Landwirtschaft trägt ebenfalls zur Feinstaubemission bei. Ihr durchschnittlicher Anteil an der europäischen PM_{10}-Emission betrug um 2001 etwa 9 %, wobei etwa die Hälfte auf Tierhaltung zurückzuführen ist.
- Quellen von Feinstaubemissionen durch Privathaushalte sind vor allem Holzheizungen und offene Kamine, da die Verbrennung von Festbrennstoffen zu wesentlich höheren Feinstaubemissionen führt als die Verbrennung flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe.[66]
- Nichtsdestotrotz starben 2012 an durch fossile Brennstoffe entstandene $PM_{2,5}$-Partikel im Freien auch etwa 10,2 Millionen Menschen; knapp zwei Drittel davon in China und Indien.[67]

- Staub entsteht auch infolge von Erosion von zementgebundenem Asbest aus Eternit, das früher als Dachdeckmaterial, Fassadenplatten, für Formteile wie Blumenkästen und Zäune eingesetzt wurde.[68][69][70]
- **In Innenräumen** sind vor allem der Rauch von Tabakwaren und Kerzen Quellen der Feinstaubbelastung.[71] Für Stäube von Laserdruckern und Tonern konnte in einer Vielzahl von Untersuchungen kein gesundheitliches Risiko festgestellt werden. Sicherheitshalber wird empfohlen, emissionsarme Geräte zu verwenden. Diese tragen den Blauen Engel.[72] Weltweit gesehen ist die Feinstaubbelastung, die beim Kochen auf offenen Feuerstellen in Innenräumen entsteht eine der häufigsten Todesursachen.[73]
- Feinstaub kann aber auch aus gasförmigen Vorläufersubstanzen wie beispielsweise Schwefeldioxid, Stickoxiden, Salpetersäure[74], Ammoniak[74][75] oder organischen Spurenstoffen entstehen. Solche sekundär gebildeten Partikel machen 30 % bis 50 % der städtischen Hintergrundbelastung aus.[76]

EU-Bürger haben seit dem 26. Mai 2011 die Möglichkeit, genau zu sehen, wer in ihrer Umgebung Luft verschmutzt. Europäische Kommission und Europäische Umweltagentur haben im European Pollutant Release and Transfer Register neue Karten veröffentlicht, die auf einer Skala von 5 × 5 km zeigen, wo Emissionsquellen wie Straßen- und Luftverkehr u. a. Feinstaub emittieren. Bisher waren solche Werte nur punktuell, z. B. bei einzelnen Industrieanlagen, einsehbar.[77][78]

Situation in Deutschland

Nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA) geht die Feinstaubbelastung in Deutschland seit Jahren zurück. Während im Jahr 1995 noch eine PM_{10}-Emission von 347.000 Tonnen gemessen wurde, waren es 2021 noch 183.990 Tonnen. In der Kategorie $PM_{2,5}$ waren es 1995 201.600 Tonnen und 2021 83,380 Tonnen.[80]

Aufgrund der großen Zahl an Verursachern ist die Feinstaubbelastung in den Ballungszentren besonders hoch, während im Umland niedrigere Werte gemessen werden. Die höchsten Werte registrierten die verkehrsnahen Messstationen. Hier lagen die Konzentrationen in den 1990er Jahren um 50 µg/m³ Luft, 2021 unter 20 µg/m³.[81]

Quellkategorien im Jahr 2022 (Tonnen/Jahr)[79]

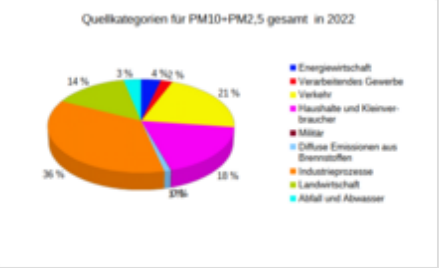
Staub	**PM_{10}**	**$PM_{2,5}$**
Energiewirtschaft	5.300	4.900
Verarbeitendes Gewerbe	3.200	2.900
Verkehr [1]	35.200	21.400
Haushalte und Kleinverbraucher [2]	24.900	23.800
Militär [3]	100	100
Diffuse Emissionen aus Brennstoffen	2.300	500
Industrieprozesse	75.800	21.000
Landwirtschaft	33.100	5.300
Abfall und Abwasser	4.600	4.400
Gesamt	184.600	84.300

1. ohne land-, forst-, fischerei- & bauwirtschaftlichen Verkehr
2. inkl. land-, forst- & fischereiwirtschaftlichem Verkehr
3. inkl. militärisch genutzter Fahrzeuge & mobiler Geräte

Böllerverbot

Das Umweltbundesamt und der Verband der pyrotechnischen Industrie (VPI) haben sich auf eine Messmethode geeinigt, um die Feinstaubbelastung zu quantifizieren, die beim Abbrand der Feuerwerke in Deutschland erzeugt wird. Danach sind es jährlich 2.050 Tonnen Feinstaub der Kategorie PM_{10} und somit 1 % der Gesamtemission pro Jahr, der Großteil davon an Silvester.[82] Dem war eine

Kontroverse über die richtige Erfassungsmethode vorausgegangen. Nach einer Meldung im Greenpeace Magazin ging der VPI von einer durch das Silvester-Feuerwerk erzeugten Menge von 1.477 Tonnen Feinstaub aus. Eine PM-Kategorie wurde in der Meldung nicht angegeben.[83]



Quellkategorien im Jahr 2022[79]

Hausheizung

Hausheizungen tragen erheblich zur Feinstaubbelastung bei. Sie unterliegen den Regelungen der Bundes-Immissionsschutzverordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV). Allerdings sanken gemäß Umweltbundesamt die Feinstaubemissionen von Kleinfeuerungsanlagen seit 2010 deutlich. So sanken die PM10 Emissionen von 32.880 Tonnen im Jahr 2010 auf 21.290 Tonnen im Jahr 2021. Die PM2,5 Emissionen sanken im gleichen Zeitraum von 31.040 auf 20.110 Tonnen.[84] Davor übersteigen die Feinstaubemissionen alleine der Holzfeuerungsanlagen sogar die Auspuffemissionen (nicht die Gesamtemissionen) aus dem Straßenverkehr.[85] Während Gas- und Ölfeuerungen, sowie Holzvergaser, Pelletheizungen und Hackschnitzelheizungen relativ niedrige Emissionen aufweisen, sind die meist mit Scheitholz betriebenen Einzelraumöfen besonders kritisch.[84] Für diese gilt nach § 26 BImSchV die *Übergangsregelung für Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe*.[86] Nach Angaben des Bundesverbandes des Schornsteinfegerhandwerks hielten 2018 bundesweit rund vier Millionen Kamin-, Kachelöfen und andere Feuerstätten für feste Brennstoffe die geforderten Grenzwerte nicht ein.[87] Dirk Messner, der Präsident des Umweltbundesamt, schlug einen Abschied vom Heizen mit Holz in Haushalten vor, da dieses aus Luftqualitätsperspektive viel Schaden anrichte.[88] Neben gesundheitsgefährdenden Luftschadstoffen wie Feinstaub und polyzyklisch aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) entstehen auch klimaschädliches Methan, Lachgas und Ruß.[89][66]

Beseitigung pflanzlicher Abfälle durch Verbrennen

Besonders bei Wetterlagen, die wegen geringer Windbewegungen in Verbindung mit einer Temperaturinversion (kalte Luft am Boden, warme Luft darüber) den Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht einschränken, lässt die Beseitigung von pflanzlichen Abfällen durch Verbrennen außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen die Luftbelastung mit Feinstaub auch über den gültigen EU-Tagesmittelwert hinaus ansteigen.[90]

Das Verbrennen von Reisig und Schlagabraum in der Forstwirtschaft ist zwar in Deutschland in den meisten Bundesländern erlaubt, aber nur bei Befall mit Borkenkäfern. Auch dann ist Häckseln die bessere Alternative.[91]

Schadstoffemissionsregister

Die Umsetzung des Europäischen Schadstoff-Freisetzungs- und Verbringungsregisters (E-PRTR) in Deutschland vollzieht das Umweltbundesamt mit der Internetplattform Thru.de. Hier können u. a. deutschlandweit die Standorte von Betrieben nach Branchen getrennt auf der Karte eingesehen werden.[92]

Situation in der Schweiz

Zur Frage der wichtigsten Verursacher von Feinstaub in der Schweiz wurde 2012 von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) durchgeführt.

Die Studie untersuchte Feinstaub der Kategorie PM_{10} und teilte ihn in folgende Gruppen ein, die stofflich differenziert werden können:

- Nitratreiche sekundäre Aerosole (NSA)
- Sulfatreiche sekundäre Aerosole (SSA)
- Mineralstaub
- Staub aus Holzfeuerung
- Strassensalz
- Staub aus dem Strassenverkehr

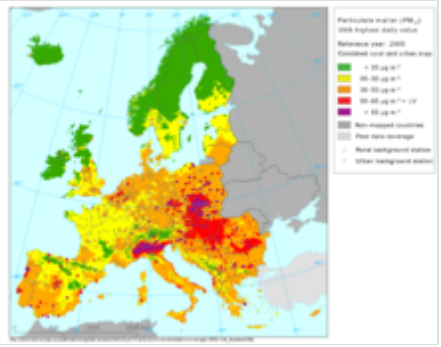
Die Konzentrationen dieser Gruppen wurden an mehreren Messstellen erfasst. Je nach Lage der Messstelle waren die Ergebnisse verschieden (Stadt, Land, Alpennordseite, Alpensüdseite), sie schwankten jedoch auch jahreszeitlich (Holzfeuerung, NSA, SSA). Die Ergebnisse sonst strukturgleicher Stationen auf der Alpennordseite waren verschieden von denen auf der Alpensüdseite. Dieses Ergebnis und das Argument der geringen Flächenausdehnung der Schweiz legten den Schluss nahe, dass ein großer Anteil des gefundenen Feinstaubs als Fremdeintrag aus benachbarten Ländern zu werten ist. Eine Zuordnung von NSA und SSA zu menschlichen Aktivitäten (z. B. Landwirtschaft) wurden von den Autoren nicht vorgenommen.[89]

Mittlere jährliche Beiträge der identifizierten Komponenten von PM10 in Prozent an der Station Bern 2008/2009	
NSA	23
SSA	15
Mineralstaub	11
Holzfeuerung	11
Strassensalz	10
Strassenverkehr	30

Reduktion

Europäische Union

In Europa wurden erstmals mit der Richtlinie 80/779/EWG vom 15. Juli 1980 (in deutsches Recht umgesetzt mit der Verordnung über Immissionswerte – 22. Bundes-Immissionsschutzverordnung) Grenzwerte für Feinstaub festgelegt. Diese Richtlinie wurde im Laufe der Jahre weiterentwickelt:



Feinstaubbelastung (PM_{10}) in Europa.

1. Seit dem 1. Januar 2005 beträgt der einzuhaltende Tagesmittelwert für PM_{10} 50 µg/m³ bei 35 zugelassenen Überschreitungen im Kalenderjahr. (In Österreich sind von 1. Januar 2005 bis 31. Dezember 2009 nur 30 Überschreitungen/Jahr erlaubt)
2. Seit dem Jahr 2005 beträgt der Jahresmittelwert für PM_{10} 40 µg/m³.
3. Seit dem 1. Januar 2010 darf der einzuhaltende Tagesmittelwert für PM_{10} weiterhin 50 µg/m³ betragen, die ursprünglich vorgesehenen nur noch 7 zugelassenen Überschreitungen im Kalenderjahr sind durch Richtlinie 2008/50/EG vom 21. Mai 2008 (Anhang XI) wieder auf die ursprünglich zulässigen 35 Überschreitungen korrigiert worden.

4. Seit dem Jahr 2010 sollte der Jahresmittelwert für PM_{10} nur noch 20 µg/m³ betragen. Auch dies ist durch die Richtlinie 2008/50/EG wieder entschärft worden, so dass seit 2010 weiter der Jahresmittelwert für PM_{10} 40 µg/m³ gilt.[93]

Bei Grenzwertüberschreitung ist ein Luftreinhalteplan oder Aktionsplan aufzustellen. Darin werden in den einzelnen europäischen Ländern unterschiedliche Strategien verfolgt:

- In London hat die 2003 eingeführte City-Maut zwar den Verkehr verringert, die Feinstaubbelastung (Immissionen) blieb aber praktisch konstant. Seit Juli 2005 beträgt die Gebühr 8 £. Im Jahr 2007 wurde die Mautzone vergrößert.[94]
- In Italien gibt es Fahrverbote, die generell, nur sonntags oder abwechselnd für Fahrzeuge mit geradem oder ungeradem Kennzeichen gelten.
- In Österreich gibt es Subventionen für Partikelfilter bei Dieselfahrzeugen sowie Förderung von Biodiesel. Außerdem gibt es Luftsanierungsgebiete – z. B. in Teilen des Inntals in Tirol oder im Großraum Graz sowie *Feinstaubtempolimits* auf diversen Autobahnen.[95]
- In Deutschland wurde der Einbau von Partikelfiltern steuerlich gefördert. Mehrere Kommunen haben 2008 Umweltzonen eingeführt, die von Fahrzeugen mit hohen Feinstaubemissionen nicht befahren werden dürfen. Weitere Kommunen planen die Einführung von Umweltzonen im Laufe der Zeit. Der Einsatz von Partikelminderungssystemen wird ab 2009 bei Lkw durch die Einordnung in eine günstigere Mautkategorie entsprechend ausgerüsteter Fahrzeuge gefördert.

Deutschland

Die Bundesregierung hatte am 31. Mai 2006 eine Verordnung zur Kennzeichnung emissionsarmer Kraftfahrzeuge (Kennzeichnungsverordnung) nach § 40 Abs. 3 des Bundesimmissionsschutzgesetzes beschlossen. Sie sollte dazu beitragen, die Feinstaubbelastung zu reduzieren, die in den Städten damals vielfach als zu hoch empfunden wurde. Dazu sah die Verordnung eine bundesweit einheitliche Kennzeichnung von Autos, Lastwagen und Bussen mit Plaketten nach Höhe ihrer Feinstaubemission vor. Zudem wurde ein neues Verkehrszeichen „Umweltzone“ eingeführt, das ein feinstaubbedingtes Fahrverbot signalisiert. In einer solchen Zone dürfen seither lediglich Fahrzeuge fahren, die eine bestimmte Plakette auf der Windschutzscheibe tragen. Die GTÜ (Gesellschaft für technische Überwachung) in Stuttgart bietet einen Dienst auf ihrer Webseite an, mit dem festgestellt werden kann, welche Feinstaubplakette für welches Fahrzeug erhältlich ist. Die Wirksamkeit und Rechtmäßigkeit der Maßnahmen wurde indes angezweifelt. Gegenwärtig wird außerdem kritisiert, dass einseitig auf den Kraftfahrzeugverkehr ausgerichtete Maßnahmen dem Verursacherprinzip nicht hinreichend Rechnung tragen, da die Feinstaubemissionen aus Industrie und privaten Feuerungsanlagen nicht herangezogen würden.

Da aufgrund von Messungen bei direkteinspritzenden Ottomotoren festgestellt wurde, dass die Kraftstoffverbrauchseinsparung mit einer erheblichen Zunahme an Feinstaubausstoß einhergeht,[96] kam es bei Festsetzung der Grenzwerte der ab 2014 geltenden „Euro 6“-Schadstoffnorm zum politischen Streit. 2011 setzten sich Herstellerverbände angeblich dafür ein, den Grenzwert höher anzusetzen als für Dieselmotoren. Dieser Plan stieß bei Umweltlobbyisten auf harsche Kritik.[97] Bei einer Umfrage durch die Meinungsforschungsinstitut YouGov haben sich 64 % der 961 Befragten für Fahrverbote bei hoher Feinstaubbelastung in deutschen Innenstädten ausgesprochen.[98]

2021 sollte ein neues Verfahren für die Abgasuntersuchung von Autos in Kraft treten, mit dem der Ausstoß von Feinstaubpartikeln geprüft werden soll. Die Einführung des angekündigten strengeren Messverfahrens könnte sich aber bis Mitte 2023 verzögern.[99]

Schweiz

In der Schweiz wurde die Messmethode für Abgasnachkontrollen bei Dieselfahrzeugen per 1. Januar 2023 verbessert.[100]

Feinstaubreduktion in Innenräumen

Bis heute wird die Feinstaubbelastung durch Tabakrauch in Innenräumen häufig ignoriert, obwohl sie alle Grenzwerte bei weitem übersteigt.

Weitere Feinstaubquellen in Innenräumen sind Laserdrucker, Kopierer, Kerzen, Kochaktivitäten und Staubsauger ohne Filter.[101] In einer Studie des DAAB und der Gesellschaft für Umwelt- und Innenraumanalytik (GUI), Mönchengladbach aus dem Jahr 2005, stellte man einen signifikanten Anstieg von Feinstaub in der Innenraumluft von Räumen mit Glattböden fest. Das spräche für den Einsatz von Teppichböden in Innenräumen, um die Belastung mit Feinstaub zu reduzieren und damit auch die Menge von allergenen Stoffen in der Raumluft. Nach den Messergebnissen liegt der arithmetische Mittelwert der Feinstaubkonzentration in Räumen mit Glattböden mit 62,9 µg/m³ deutlich oberhalb des gesetzlichen Grenzwertes von 50 µg/m³. Bei den Haushalten mit Teppichböden liegt der Mittelwert bei 30,4 µg/m³, und damit deutlich unterhalb des Grenzwertes. Das Justizministerium Niedersachsen tauschte, nachdem erhöhte Feinstaubwerte im Amtsgericht Burgwedel[102] festgestellt wurden, einem Ministeriumssprechers zufolge im Jahr 2012 alle 4.033 Laserdrucker „zur Vorsorge und Beruhigung der Mitarbeiter“[103] gegen emissionsarme Tintenstrahldrucker aus.

Feinstaubbelastung in Innenräumen ist ein wichtiges Thema der Arbeitsmedizin. Ein besonderes Risiko besteht bei der Bearbeitung mineralischer Werkstücke, bei der Holzbearbeitung, aber auch in Küchen und beim Friseurhandwerk. Der Schutz der Arbeitnehmer ist in der Gefahrstoffverordnung und den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) festgelegt. Sie werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) herausgegeben.[104]

Andere Länder

Die höchste Feinstaubbelastung aller 31 OECD-Hauptstädte weist Seoul auf. Der weitere Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs (siehe U-Bahn Seoul) soll einen Rückgang des Kraftverkehrs herbeiführen; daneben will die Regierung Anreize zur Benutzung weniger stark verschmutzender Fahrzeuge und zum Einbau emissionssenkender Technik geben.[105]

WHO

Die WHO-Luftgüte-Richtlinie (Stand 2021) sieht folgende Grenzwerte vor:[106]

- $PM_{2,5}$: Jahresmittel maximal 5 µg/m³
- $PM_{2,5}$: Tagesmittel maximal 15 µg/m³ mit 3-4 zulässigen Tagen, an denen eine Überschreitung möglich ist

- PM_{10}: Jahresmittel maximal 15 µg/m³
- PM_{10}: Tagesmittel maximal 45 µg/m³ mit 3-4 zulässigen Tagen, an denen eine Überschreitung möglich ist

Die Richtwerte der WHO liegen damit deutlich unter den rechtswirksamen Grenzwerten der EU (s. o.).

Physikalische Eigenschaften

Die Physik der Staubpartikel in der Atmosphäre und ihre numerische Simulation beruhen auf dem Massen-, Impuls- und Energieerhaltungssatz. Die Anzahl, Größenverteilung und Zusammensetzung von Partikeln in der Luft sind abhängig von ihrem Eintrag in die Atmosphäre (Emission), dem Austrag durch trockene oder nasse Deposition, chemischen Reaktionen, physikalischen Effekten wie Koagulation und Kondensation sowie der Luftbewegung.

Zur Modellierung verwendete man zunächst meteorologisch-chemische Modelle, die für die Simulation des Verhaltens von Gasen in der Luft entwickelt worden waren. Sie werden als Chemie-Transport-Modelle (CTM) bezeichnet. Mit Hilfe sogenannter Aerosolmodule gelang es, die CTMs zu verbessern und auch das Verhalten von Partikeln besser zu simulieren. Derart angepasste CTMs nennt man auch Aerosol-Chemie-Transport-Modelle (ACTM).[107]

Feinstaubtransport mit der Luft

Feinstaubpartikel setzen sich bedingt durch ihre geringe Größe nur langsam ab. Die stationäre Sinkgeschwindigkeit bei angenommener laminarer Umströmung des Partikels ergibt sich aus dem Gleichgewicht von Schwerkraft, Auftrieb und Reibungskraft zu[108][109]

$$u = \frac{d^2 \cdot \Delta\rho \cdot g}{18 \cdot \eta}$$

(Sinkgeschwindigkeit u, Partikeldurchmesser d, Dichtedifferenz $\Delta\rho$, Fallbeschleunigung g, Luftviskosität η)

Durch Einsetzen eines Mikrometer-Partikels der Dichte 1000 kg/m³ in diese Gleichung erhält man damit eine Sinkgeschwindigkeit in Luft (Viskosität etwa $20 \cdot 10^{-6}$ Pa·s) von etwa $3 \cdot 10^{-5}$ m/s oder 10 cm/Stunde. Das Partikel würde in einer turbulenzfreien horizontalen Strömung der Geschwindigkeit 1 m/s auf eine Strecke von etwa 70 km nur 2 m an Höhe verlieren. Kleinere Partikel sinken noch weitaus langsamer, während größere Partikel mit einem Durchmesser von 10 Mikrometern in einer Stunde 10 m absinken würden.

Staub folgt auch den Stromlinien der Luft, er wird mit dem Wind transportiert. Unter bestimmten Bedingungen kann Feinstaub auch über Kontinentalgrenzen hinweg transportiert werden. Auch in sogenannte „Umweltzonen“ wird Staub von außerhalb eingetragen.

Korngrößenverteilung und Koagulation

Sehr kleine Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 µm entstehen bei unvollständiger Verbrennung oder bilden sich aus gasförmigen Vorläufersubstanzen. Wenn sie aufeinandertreffen, bleiben sie häufig aneinander haften und bilden größere Partikel. Dadurch geht die Anzahl der ultrafeinen Partikel

in der Luft meist rasch zurück. Dieser Vorgang wird als Nukleation, Koagulation oder Agglomeration bezeichnet. Wegen ihrer jeweils sehr geringen Masse tragen ultrafeine Staubteilchen nur einen sehr kleinen Anteil zur Gesamtmasse des Staubs bei, obwohl sie bei weitem die häufigsten Partikel in der Luft sind. Die Partikelanzahlkonzentration liegt typischerweise im Bereich von 5.000 bis 50.000/cm³. An einer Messstation im Ruhrgebiet, die den städtischen Hintergrund repräsentiert, wurde eine mittlere Partikelkonzentration von 13.000/cm³ (Median 11.500/cm³) gemessen. Bei einer Vergleichsstation an einer stark befahrenen Straße betrug die Partikelanzahlkonzentration 25.500/cm³ (Median 18.000/cm³).[110]

Das Volumenspektrum von Staubteilchen in der Atmosphäre zeigt üblicherweise eine dreigipfelige Verteilung, es sind also drei Moden erkennbar. Die kleinsten Teilchen zeigen einen Gipfel um den Partikelradius von 0,018 µm, die Nukleationsmode. Diese Partikel koagulieren innerhalb weniger Stunden oder Tage mit anderen Partikeln und werden so aus der Luft entfernt. Die Nukleationsmode kann fehlen, wenn nicht ständig neue Nukleationsaerosole nachgeliefert werden.[111]

Bei den etwas größeren Partikeln hat die Verteilung ein weiteres Maximum um den Partikelradius 0,1 µm, die sogenannte Akkumulationsmode. Die Lücke zwischen Nukleations- und Akkumulationsmode entsteht dadurch, dass ein kleiner und ein mittelgroßer Partikel eher koagulieren als zwei kleine.[111] Diese größeren Feinstaub-Partikel mit Durchmessern von 80 nm bis 1 µm entstehen durch die Koagulation kleinerer Partikel oder die Anlagerung von Gasen. Ihre Verweildauer in der Atmosphäre ist mit mehreren Tagen vergleichsweise hoch. Sie werden überwiegend durch nasse Deposition aus der Luft entfernt. Solche Partikel können über mehrere tausend Kilometer transportiert werden, sofern entlang ihrer Zugbahn kein Niederschlag fällt. Falls die Verdünnung der Partikel zusätzlich durch eine Inversionsschicht behindert wird, können hohe Feinstaub-Konzentrationen in größerer Entfernung vom Entstehungsort auftreten.[110]

Das dritte Maximum, die Dispersionsmode, besteht überwiegend aus vom Boden aufgewirbeltem Grobstaub.[111] Solche Grobpartikel mit Durchmessern von mehr als 1 µm entstehen meist durch Winderosion oder durch mechanischen Abrieb.[110]

Feinstaub-Teilchen unterliegen der nach unten gerichteten Sedimentation und der Diffusion, die sie von der hohen zur niedrigen Konzentration gelangen lässt. Aus dieser Überlegung lässt sich herleiten, dass für das Zusammentreffen zweier Partikel die Koagulationsrate J sowohl proportional zur Summe der Radien beider Partikel als auch zur Summe ihrer Diffusionskoeffizienten ist.

$$J = 4 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2) \cdot (D_1 + D_2) \cdot n_1(\infty) \cdot n_2(\infty)$$

(Koagulationsrate J, Partikelradius R, Diffusionskoeffizient D, Partikelanzahl n)

Radius und Diffusionskoeffizient wirken entgegengesetzt. Kleine Partikel haben einen großen Diffusionskoeffizienten, ein Aufeinandertreffen ist wegen ihres geringen Durchmessers aber unwahrscheinlich. Für große Teilchen ist der Einfluss der Diffusion gering. Bei zwei kleinen Partikeln ist die Summe ihrer Radien klein, bei zwei großen die Summe ihrer Diffusionskoeffizienten. Das Produkt aus den Summen bleibt in beiden Fällen klein. Für zwei unterschiedlich große Partikel ist die Koagulationsrate

proportional zum Produkt des größeren Radius des großen und des höheren Diffusionskoeffizienten des kleinen Partikels. Die Koagulationsrate ist daher bei Partikeln von sehr unterschiedlicher Größe am höchsten.[112]

Recht

Europäische Union

Nach der Richtlinie 80/779/EWG wurden die Mitgliedstaaten zur Einhaltung folgender Grenzwerte ab 1. April 1983 verpflichtet:[113]

- 80 µg/m³ für den Median der während des Jahres gemessenen Tagesmittelwerte von Schwebstaub;
- 130 µg/m³ für den Median der im Winter gemessenen Tagesmittelwerte von Schwebstaub;
- 250 µg/m³ für den 98-Prozent-Wert der Summenhäufigkeit aller während des Jahres gemessenen Tagesmittelwerte von Schwebstaub, eine Überschreitung ist nur einmal an höchstens drei aufeinanderfolgenden Tagen erlaubt.

Der Europäische Gerichtshof hat 1991 festgestellt, dass die Bundesrepublik Deutschland die Richtlinie nicht rechtzeitig umgesetzt hatte; die Grenzwerte wurden jedoch eingehalten. Die Bundesrepublik Deutschland berief sich darauf, dass mit dem Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 15. März 1974 bereits der Schutz gewährleistet sei. Außerdem sei die TA Luft entsprechend angepasst worden. Die Kommission sah jedoch darin keine hinreichenden Regelungen. Das Gericht beanstandete unter anderem, dass die TA Luft in ihrem Geltungsumfang nicht dem Charakter der Richtlinie entspreche. Insbesondere sei „der Schwellenwert, von dem an Umwelteinwirkungen als schädlich anzusehen sind, nicht festgelegt“.[114]

Die 1996 beschlossenen Richtlinie 96/62/EG schreibt Mess- und Informationspflichten auch zu Feinstaub vor.[115] Wegen Verstoßes dagegen hat der Europäische Gerichtshof Frankreich und Spanien in Vertragsverletzungsverfahren verurteilt.

Die 1999 beschlossene Richtlinie 99/30/EG legt für die Zeit ab 1. Januar 2005 folgende Grenzwerte fest:[116]

- 50 µg/m³ für den 24-Stunden-Mittelwert von PM_{10}, es sind 35 Überschreitungen pro Jahr erlaubt;
- 40 µg/m³ für den Jahresmittelwert von PM_{10}.

Ebenfalls in der Richtlinie 99/30/EG ist festgelegt, dass am 1. Januar 2010 folgende Verschärfungen der Grenzwerte in Kraft treten sollten, wenn sie nicht vorher geändert werden:

- weiterhin 50 µg/m³ für den 24-Stunden-Mittelwert von PM_{10}, es sind jedoch nur noch 7 Überschreitungen pro Jahr erlaubt;
- 20 µg/m³ für den Jahresmittelwert von PM_{10}.

Diese geplante Verschärfung wurde mit der Richtlinie 2008/50/EG am 21. Mai 2008 (Anhang XI) außer Kraft gesetzt.[117]

Die zuständigen Behörden müssen bei Überschreitungen kurzfristig mit Aktionsplänen Gegenmaßnahmen treffen. Sie sind verpflichtet, Luftreinhaltepläne aufzustellen, wenn zukünftig geltende Grenzwerte deutlich überschritten werden.

In mehreren europäischen Ballungsgebieten werden die Grenzwerte überschritten. Im Jahr 2005 hat Stuttgart als erste deutsche Stadt am 13. März den Grenzwert zum 35. Mal überschritten. In Österreich ist die Feinstaubbelastung in Graz am stärksten: so wurde im Jahr 2003 der zulässige Grenzwert 50 µg/m³ an insgesamt 135 Tagen statt der maximal zulässigen 35 Tagen überschritten. Wegen angeblich aus Osteuropa importierten Feinstaubs wurde in Belgien am 8. Februar 2010 auf Autobahnen und Landstraßen vorläufig die maximal zulässige Geschwindigkeit auf 90 km/h und in Brüssel auf 50 km/h herabgesetzt.[118] Am 9. Februar 2010 wurde ebenfalls für die Ile-de-France („Ballungsraum Paris“) Feinstaubalarm gegeben.[119]

Schweiz

In der Schweiz beträgt der Grenzwert für PM_{10} für den Jahresmittelwert 20 µg/m³.[120] In dicht besiedelten Regionen und entlang von stark befahrenen Verkehrsachsen wurde dieser Wert im Jahr 2000 und im Winter 2005 Mittelland (Schweiz) überschritten.

Der Grenzwert für PM_{10} als 24-h-Mittelwert von 50 µg/m³ darf höchstens dreimal im Jahr überschritten werden.[120] Dies kann aber nur in wenigen Jahren und wenigen Kantonen eingehalten werden.

Die permanente Überschreitung von Grenzwerten lässt viele Schweizerinnen und Schweizer an der Glaubwürdigkeit von Grenzwerten zweifeln. Der Feinstaub-Tagesmittelwert wurde im Februar 2006 um das Vielfache überschritten, so in Lausanne mit 223 µg/m³. Als Sofortmaßnahme wurden in elf Kantonen vom 3. Februar bis zum 8. Februar 2006 die Geschwindigkeitslimits auf den Autobahnen auf 80 km/h herabgesetzt. In gewissen Kantonen wurde das Anzünden von Kaminfeuern untersagt.

Einer Doktorarbeit von Peter Straehl (*Kanzerogene Luftschadstoffe in der Schweiz*, 2003) ist zu entnehmen, dass in der Schweiz pro Jahr rund 300 Krebsfälle durch „partikelförmige Luftschadstoffe“ verursacht werden. Die Herabsetzung von diesbezüglichen Emissionen durch z. B. schadstoffärmere Lkw-Motoren wird aber nicht im vorgeschlagenen Tempo, sondern im Gleichschritt mit den langsamer sich senkenden EU-Normen verwirklicht. Hingegen dürfen in der Schweiz keine Baumaschinen mehr ohne Partikelfilter verkauft werden. Alte Maschinen mit Baujahr vor 2000 müssen bis 2015 nachgerüstet sein.[121]

Nach der Dürre und Hitze in Europa 2018 hat die Genossenschaft Migros Aare kurz vor Silvester verlauten lassen, sie werde ab sofort dauerhaft auf den Verkauf von Feuerwerkskörper verzichten.[122] Während der Dürre und Hitze in Europa 2022 ließ die Migros auf Anfrage verlauten, dass nun alle zehn Genossenschaften den Verkauf von Feuerwerkskörper eingestellt haben.[123] In der Schweiz werden durch Feuerwerke 320 Tonnen Feinstaub pro Jahr freigesetzt, was 2 Prozent der jährlichen Emissionen entspricht.[124]

USA

Der 24-Stunden-Mittelwert für PM_{10} darf 150 µg/m³ höchstens einmal pro Jahr überschreiten (auf Basis eines 3-Jahres-Durchschnitts).[125][126] Der Grenzwert von 50 µg/m³ für den Jahresmittelwert wurde im Dezember 2006 aufgehoben, weil es keine Beweise für gesundheitliche Probleme bei Langzeitexposition gab.[126][127][128]

Bei $PM_{2,5}$ beträgt der Grenzwert für den Mittelwert von drei Jahren 15 µg/m³. Zusätzlich muss der Mittelwert in der 98. Perzentile der 24-Stunden-Werte dreier Jahre 65 µg/m³ einhalten.[125][129]

Die nationale Umweltschutzbehörde U.S. Environmental Protection Agency hatte die $PM_{2,5}$-Grenzwerte 1997 erlassen, wogegen Industrieorganisationen und Bundesstaaten klagten und 1999 gewannen. Dieses Urteil wurde jedoch 2001 vom Bundesgericht (Supreme Court) aufgehoben und festgestellt, dass die Umweltbehörde verfassungsgemäß ermächtigt wurde, Grenzwerte festzulegen, und dabei nicht die daraus resultierenden wirtschaftlichen Kosten zu beachten braucht. 2002 stellte ein Gericht dazu fest, dass die Umweltschutzbehörde weder ihren Ermessensspielraum überschritten noch willkürlich gehandelt hat.[130][131][132]

Messtechnische Erfassung von Feinstaub

Die messtechnische Erfassung von Feinstaub kann emissionsseitig mittels eines zweistufigen Kaskadenimpaktors erfolgen. Dessen erste Stufe dient der Grobabscheidung, während die zweite Stufe die Fraktion PM_{10} und der Endfilter die Fraktion $PM_{2,5}$ sammelt.[133][134] Immissionsseitig wird ein gravimetrisches Verfahren als Referenzmessverfahren beschrieben: Staubhaltige Luft wird durch einen größenselektiven Einlass gesaugt und über einen Filter geleitet. Dieser wird anschließend ausgewogen.[135]

Bei amtlichen Immissionsmessungen dienen gravimetrische Verfahren als Referenzmethode, aber auch zur Bestimmung der 24-Stunden-Werte. Üblicherweise stehen diese Werte jedoch erst mit einigen Tagen bis mehreren Wochen Verzögerung zur Verfügung, da die beladenen Filter (bzw. Filtermagazine) zunächst von der Messstation in ein Labor verbracht und dort ausgewogen werden müssen.

Da die Öffentlichkeit zumindest über die aktuelle Belastung der Umgebungsluft mit der Feinstaubfraktion PM_{10} stündlich unterrichtet werden soll[93] kommen in den amtlichen Messstationen auch kontinuierlich arbeitende Verfahren zum Einsatz, beruhend z. B. auf

- Radiometrische Staubmessung (Abschwächung von Beta-Strahlung beim Durchgang durch eine Filterprobe),
- dem sog. TEOM-Prinzip (Verstimmung der Resonanzfrequenz eines Biegeschwingers aufgrund anfiltrierten Feinstaubs),
- Lichtstreuung (sog. Aerosolspektrometer).

Zur Erfassung von Feinstaub in der Innenraumluft kommen unter anderem

- gravimetrische Verfahren,
- photometrische Verfahren,
- Kondensationspartikelzähler und
- Aerosol-Elektrometer

zum Einsatz.[136] Messgrößen sind Partikelmassenkonzentration, Partikelanzahlkonzentration, Partikeloberflächenkonzentration oder Partikelvolumenkonzentration. Um die Zuverlässigkeit von Messungen zu überprüfen, wurden in Deutschland in den 1980er-Jahren entsprechende VDI-Richtlinien von der Kommission Reinhaltung der Luft entwickelt.[137]

Siehe auch

- Aerosol
- EN 13779 – Norm zur Klassifizierung der Qualität der Raum-, Zu-, Fort- und Außenluft
- Liste der Städte mit der weltweit stärksten Luftverschmutzung
- Liste der Länder nach Luftverschmutzung
- Luftfilter
- Quarzfeinstaub

Literatur

Bücher:

- *Feinstaub durch Straßenverkehr – Bundespolitischer Handlungsbedarf*. (http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2005_Stellung_Feinstaub_durch_Strassenverkehr.pdf?__blob=publicationFile) (PDF) 6. Auflage. Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin 2005, ISSN 1612-2968.
- H.-Erich Wichmann, Joachim Heinrich, A. Peters: *Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub.* Ecomed, 2002, ISBN 3-609-16105-1.
- Andreas Hainsch: *Ursachenanalyse der PM10-Immission in urbanen Gebieten am Beispiel der Stadt Berlin.* Dissertation. TU Berlin, 2003. urn:nbn:de:kobv:83-opus-6296 (https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:83-opus-6296)
- Friedhelm Schneider, Michael Steinhöfel: *Fein[d]staub in Innenräumen.* EU-Umweltakademie, Rosenheim 2013, ISBN 978-3-9812818-5-9.

Aufsätze:

- Joachim Heinrich, Veit Grote, Annette Peters, H.-Erich Wichmann: *Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub: Epidemiologie der Langzeiteffekte.* In: *Umweltmedizin in Forschung und Praxis.* 7, Nr. 2, 2002, S. 91–99.
- Arbeitsgruppe ‚Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit' der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN: *Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur gesundheitlichen Wirkung von Partikeln in der Luft.* In: *Umweltmedizin in Forschung und Praxis.* 8, Nr. 5, 2003, S. 257–278.
- Deutscher Allergie- und Asthmabund e. V. (DAAB) Gesellschaft für Umwelt- und Innenraumanalytik (GUI), Mönchengladbach: *Studie zur Feinstaubbelastung im Innenraum.* 2005.
- J. Junk, A. Helbig: *Die PM10-Staubbelastung in Rheinland-Pfalz. Neue gesetzliche Regelungen für Feinstaub und erste Messergebnisse.* In: *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft.* 63, Nr. 1/2, 2003, S. 43.
- Christopher Neumaier: *Das „Feinstaubgespenst" 2005. Reelle Gefahr oder soziale Konstruktion eines Risikos?* In: Christine Pieper, Frank Uekötter (Hrsg.): *Vom Nutzen der Wissenschaft. Beiträge zu einer prekären Beziehung*. Stuttgart 2010, ISBN 978-3-515-09439-9, S. 255–266.

- T. Pregger, R. Friedrich: *Untersuchung der Feinstaubemissionen und Minderungspotenziale am Beispiel Baden-Württemberg.* In: *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft.* 64, Nr. 1/2, 2004, S. 53–60.
- M. Struschka, V. Weiss, G. Baumbach: *Feinstaub – Emissionsfaktoren und Emissionsaufkommen bei kleinen und mittleren Feuerungsanlagen.* In: *Immissionsschutz.* (Berlin) 9, Nr. 1, 2004, ISSN 1430-9262, S. 17–22.
- H.-Erich Wichmann: *Feinstaub: Lufthygienisches Problem Nr. 1 – eine aktuelle Übersicht.* In: *Umweltmedizin in Forschung und Praxis.* 10, Nr. 3, 2005, S. 157–162.
- Vera Zylka-Menhorn: *Feinstäube – Winzlinge mit großer Wirkung.* In: *Deutsches Ärzteblatt.* 102, Nr. 14, 2005, S. A954–A958.
- G. Invernizzi u. a., *Particulate matter from tobacco versus diesel car exhaust: an educational perspective.* In: *Tobacco Control.* Band 13, 2004, S. 219–221 doi:10.1136/tc.2003.005975.
- Thomas Gabrio, Gerhard Volland, Irma Baumeister, Josef Bendak, Annemarie Flicker-Klein, Monika Gickeleiter, Georg Kersting, Valentina Maisner, Iris Zöllner: *Messung von Feinstäuben in Innenräumen.* In: *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft.* 67, Nr. 3, 2007, S. 96–102.
- Peter Bruckmann, Thomas Eikmann: *Feinstäube und menschliche Gesundheit.* In: *Chemie in unserer Zeit.* 41, Nr. 3, 2007, S. 248–253, doi:10.1002/ciuz.200700419.
- Thomas P. Streppel: *Rechtsschutzmöglichkeiten des Einzelnen im Luftqualitätsrecht.* In: *Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht (EurUP).* 2006, S. 191.
- Manfred Santen, Martin Wesselmann, Ursula Fittschen, Ruth Cremer, Peter Braun, Anja Lüdecke, Heinz-Jörn Moriske: *Untersuchungen zur Belastung mit feinen und ultrafeinen Partikeln in bewohnten Innenräumen.* In: *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft.* 69, Nr. 3, 2009, S. 63–70.
- Thomas Gabrio: *Feinstaub in Bürogebäuden.* In: *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft.* 70, Nr. 3, 2010, S. 63–69.
- Wolfram Jörß, Volker Handke, Lukas Emele, Margarethe Scheffler, Vanessa Cook, Jochen Theloke, Balendra Thiruchittampalam, Frank Dünnebeil, Wolfram Knörr, Christoph Heidt, M. Jozwicka, J. J. P. Kuenen, H. A. C. Denier van der Gon, A. J. H. Visschedijk, R. N. van Gijlswijk, Bernhard Osterburg, Birgit Laggner, Rainer Stern: *Luftqualität 2020/2030: Weiterentwicklung von Prognosen für Luftschadstoffe unter Berücksichtigung von Klimastrategien.* UBA Texte 35-2014. Umweltbundesamt (Hrsg.). Dessau-Roßlau. Juli 2014. ISSN 1862-4804.(online (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_35_2014_komplett.pdf) (PDF; 10,4 MB))
- Beate Ritz, Barbara Hoffmann, Annette Peters: *Auswirkungen von Feinstaub, Ozon und Stickstoffdioxid auf die Gesundheit.* In: *Deutsches Ärzteblatt.* Band 116, Heft 51–52, 23. Dezember 2019, S. 881–886.

diverse Artikel:

- *(Feinstaub) Die unsichtbare Gefahr*. In: *Der Spiegel*. Nr. 14, 2005 (online (https://www.spiegel.de/spiegel/print/d-39916242.html)).
- *Giftige Emissionen verkürzen das Leben*. (http://www.sz-online.de/nachrichten/giftige-emissionen-verkuerzen-das-leben-962060.html) In: *Süddeutsche Zeitung.* online, 5. April 2005.
- *Dieselruß – Sieben überraschende Antworten*. (http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal_content/56/12054/1627850/Dieselru%C3%9F-%E2%80%93-Sieben-%C3%BCberraschende-Antworten/) In: *Bild der Wissenschaft.* 1. Dezember 1999.
- Christel Kappis u. a.: *Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen.* (http://www.helix-pflanzensysteme.de/media/block_downloads/49/humboldt-uni-berlin_feinstaubstudie.pdf) (PDF) In Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Humboldt-Universität zu Berlin, Fachgebiet Klima- und Vegetationsgeographie, hg. vom Verein zur Förderung agrar- und

stadtökologischer Projekte e. V. (A.S.P.), Berlin 2007 (Forschungsprojekt Nr. 06HS021, Aktenzeichen: 514-33.40/06HS021) (PDF; 2,6 MB, auf helix-pflanzensysteme.de).
- Paul-Scherrer-Institut: *Auch Feinstaub altert* (http://www.psi.ch/media/auch-feinstaub-altert). Juli 2011 (Der Alterungsprozess hängt wesentlich von der Luftfeuchte ab).

Weblinks

Wiktionary: Feinstaub – Bedeutungserklärungen, Wortherkunft, Synonyme, Übersetzungen

- Bundesamt für Umwelt (Schweiz), bafu.admin.ch: *Feinstaub* (https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz/feinstaub.html)
- feinstaub.ch: Infoplattform Feinstaub (https://feinstaub.ch/) (Schweizer Luftreinhalte-Fachstellen)
- Jörg Kachelmann: *Diesel? Die Politik ignoriert ein viel größeres Problem*. (https://www.t-online.de/nachrichten/panorama/id_84599106/kachelmanns-donnerwetter-diesel-die-politik-ignoriert-ein-groesseres-problem.html) t-online.de, 13. Oktober 2018
- *Luft und Luftreinhaltung*. (https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft) umweltbundesamt.de
- *Feinstaub.* (https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub) (umweltbundesamt.de)
- *Staub.* (http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschadstoffe/staub/) Umweltbundesamt (Österreich)
- luftdaten.info (http://luftdaten.info/) – Website einer Stuttgarter Bürgerinitiative, mit Anleitung für Selbstbau-Messgeräte und open-data-Messwertkarte
- Infographic: The 100 most polluted cities in the world (https://www.aljazeera.com/news/2021/11/22/infographic-the-worlds-100-most-polluted-cities-interactive) (eng.)

Messung und Vorhersage:

- umweltbundesamt.de: Aktuelle Tagesmittelwerte PM10 (http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/aktuelle-luftdaten)
- zamg.ac.at, *Feinstaub* (https://www.zamg.ac.at/cms/de/umwelt/luftqualitaetsvorhersagen/schadstofftransport/?imgtype=1): 3-Tage-Vorhersage Europa (WRF/Chem), auf der Website des österreichischen Wetterdienstes (ZAMG): *Umwelt: Luftqualität*
- World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index (https://waqi.info/)

Einzelnachweise

1. James H. Vincent: *Aerosol Sampling – Science, Standards, Instrumentation and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester 2007, ISBN 978-0-470-02725-7, S. 321.
2. Markus Mattenklott, Norbert Höfert: *Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt – Vergleich der Begriffsbestimmungen.* In: *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft.* 69, Nr. 4, 2009, S. 127–129.
3. *Partikel in der Innenraumluft.* (https://iaqip.wki.fraunhofer.de/de/daten-und-fakten/partikel-in-der-innenraumluft.html) In: *Informationsplattform Innenluftqualität.* Fraunhofer-Instituts für Holzforschung, 2021, abgerufen am 23. Januar 2022.
4. *Ambient (outdoor) air pollution.* (https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) World Health Organization, 22. September 2021, abgerufen am 15. Januar 2022 (englisch).
5. *WHO global air quality guidelines.* (https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1372908/retrieve) World Health Organization, 2021, abgerufen am 21. Januar 2022 (englisch).

6. Ole Raaschou-Nielsen, Zorana J. Andersen, Rob Beelen, Evangelia Samoli, Massimo Stafoggia: *Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE)*. In: *The Lancet Oncology*. Band 14, Nr. 9, 10. Juli 2013, S. 813–822, doi:10.1016/S1470-2045(13)70279-1 (https://doi.org/10.1016/S1470-2045%2813%2970279-1) (openaccessrepository.it (https://www.openaccessrepository.it/record/23400) [abgerufen am 12. Mai 2022]).
7. *Particulate Matter (PM) Basics.* (https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics) US Environmental Protection Agency, 19. April 2016, abgerufen am 25. Januar 2022 (englisch).
8. Deutsches Institut für Normung e. V., Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.): *Feinstaub und Stickstoffdioxid – Wirkung – Quellen – Luftreinhaltepläne – Minderungsmaßnahmen.* Beuth Verlag, Berlin 2006, ISBN 3-410-16237-2, S. 17.
9. Mark L. Maiello, Mark D. Hoover (Hrsg.): *Radioactive Air Sampling Methods.* CRC Press, Boca Raton 2010, ISBN 978-0-8493-9717-2, S. 141.
10. *Support to the development of the Second Clean Air Outlook.* (https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/CAO2-MAIN-final-21Dec20.pdf) In: *International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).* EUROPÄISCHE KOMMISSION, 21. Dezember 2020, abgerufen am 13. April 2022 (englisch).
11. Europäische Kommission: *ZWEITER AUSBLICK ZUR ENTWICKLUNG DER LUFTQUALITÄT. BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN* , abgerufen am 29. Januar 2022, 8. Januar 2021, S. 12.
12. *Environmental protection – Safer Rwanda.* (https://saferrwanda.org/environmental-protection/) Safer Rwanda, abgerufen am 22. Januar 2022 (amerikanisches Englisch).
13. Ritz B, Hoffmann B, Peters A: *Auswirkungen von Feinstaub, Ozon und Stickstoffdioxid auf die Gesundheit.* (https://www.aerzteblatt.de/archiv/211419/Auswirkungen-von-Feinstaub-Ozon-und-Stickstoffdioxid-auf-die-Gesundheit) Deutsches Ärzteblatt DOI: 10.3238/arztebl.2019.0881, 23. Dezember 2019, abgerufen am 18. Juni 2022.
14. Hermann Fromme, Norbert Englert, Helmut Sagunski, Thomas Gabrio, Thomas Lahrz, Inge Mangelsdorf, Friederike Neisel: *Gesundheitliche Bedeutung von Feinstaub in der Innenraumluft.* (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/feinstaub_2008.pdf) In: *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsschutz 11.* Umweltbundesamt, 2008, abgerufen am 22. Januar 2022.
15. Alexandra Schneider: *Feinstaub und Gesundheit.* (https://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/EPI_II/PDF/Feinstaub_Schneider_2015.pdf) In: *Luftschadstoffe und Gesundheit.* Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt GmbH, Institut für Epidemiologie II, 2015, abgerufen am 22. Januar 2022.
16. Invernizzi, Giovanni et al.: *Particulate matter from tobacco versus diesel car exhaust: an educational perspective*. In: *Tobacco Control*. Volume 13, Nr. 3, 2004, S. 219–221, doi:10.1136/tc.2003.005975 (https://doi.org/10.1136/tc.2003.005975), PMC 1747905 (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1747905/) (freier Volltext).
17. *Rauchen ist die weitaus größte Feinstaubbelastung.* (https://www.lungenaerzte-im-netz.de/news-archiv/meldung/article/rauchen-ist-die-weitaus-groesste-feinstaubbelastung/) Deutsche Lungenstiftung e. V., 23. November 2018, abgerufen am 23. Januar 2022.
18. *Leichte und starke Raucher.* (https://www.lungenaerzte-im-netz.de/rauchstopp/leichte-und-starke-raucher/) Deutsche Lungenstiftung e. V., abgerufen am 23. Januar 2022.
19. *Was ist eine Lungenentzündung?* (https://www.lungenaerzte-im-netz.de/krankheiten/lungenentzuendung/ursachen/) Deutsche Lungenstiftung e. V., abgerufen am 23. Januar 2022.
20. *Staublunge.* (https://www.staublungenforschung.ch/de/) Stiftung für Staublungenforschung, abgerufen am 26. Januar 2022 (Schweizer Hochdeutsch).

21. *Rippenfellkrebs oft durch Asbest verursacht.* (https://www.lungenaerzte-im-netz.de/news-archiv/meldung/article/rippenfellkrebs-oft-durch-asbest-verursacht/) Deutsche Lungenstiftung e. V., 22. Oktober 2012, abgerufen am 23. Januar 2022.
22. *DIMDI – ICD-10-WHO Version 2019.* (https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-who/kode-suche/htmlamtl2019/block-j60-j70.htm#J60) Deutsches Institut für medizinische Dokumentation und Information, 2019, abgerufen am 26. Januar 2022.
23. *Was sind Pollen.* (https://web.archive.org/web/20210804004537/https://www.uniklinikum-saarland.de/de/einrichtungen/kliniken_institute/medizinische_kliniken/innere_medizin_v/patienten_informationen/pollenwarndienst/was_sind_pollen/) In: *Pollenwarndienst der Klinik für Innere Medizin.* Universitätsklinikum des Saarlandes und Medizinische Fakultät der Universität des Saarlandes, archiviert vom Original (https://redirecter.toolforge.org/?url=https%3A%2F%2Fwww.uniklinikum-saarland.de%2Fde%2Feinrichtungen%2Fkliniken_institute%2Fmedizinische_kliniken%2Finnere_medizin_v%2Fpatienten_informationen%2Fpollenwarndienst%2Fwas_sind_pollen%2F) (nicht mehr online verfügbar) am 4. August 2021; abgerufen am 23. Januar 2022.
24. *Was ist Heuschnupfen?* (https://www.lungenaerzte-im-netz.de/krankheiten/heuschnupfen/was-ist-heuschnupfen/) Deutsche Lungenstiftung e. V., abgerufen am 23. Januar 2022.
25. Heinz-Jörn Moriske, Regine Szewzyk, Peter Tappler, Kerttu Valtanen: *Leitfaden Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden.* (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf) Umweltbundesamt Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, November 2017, abgerufen am 25. Januar 2022.
26. *Schimmelpilzbefall der Lunge schwerer zu bekämpfen.* (https://www.lungenaerzte-im-netz.de/news-archiv/meldung/article/schimmelpilzbefall-der-lunge-schwerer-zu-bekaempfen/) Deutsche Lungenstiftung e. V., 16. Juli 2018, abgerufen am 25. Januar 2022.
27. *Gefährliches Versteckspiel in der Lunge.* (https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/fileadmin/kinderklinik/kinderklinik_3/PDF/08_Oktober_2008.pdf) (PDF; 249 KB) Universitätsklinikum Heidelberg, 8. Oktober 2008, abgerufen am 25. Januar 2022.
28. *Humantoxikologisches Potenzial von Holzstäuben.* (https://mluk.brandenburg.de/media_fast/4055/lua_bd34.pdf) (PDF; 405 KB) In: *Studien und Tagungsberichte, Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg ISSN 0948-0838, Band 34.* Landesumweltamt Brandenburg, 2001, abgerufen am 26. Januar 2022.
29. *Studie zu Luftverschmutzung: Bis zu 33 Prozent weniger Asthmafälle bei hoher Luftreinheit.* (https://www.aerztezeitung.de/medizin/krankheiten/asthma/article/993590/studie-luftverschmutzung-33-prozent-weniger-asthmafaelle-bei-hoher-luftreinheit.html) In: *aerztezeitung.de.* 12. August 2019, abgerufen am 18. August 2019.
30. welt.de (https://www.welt.de/wissenschaft/article96820/Luftverschmutzung-verursacht-Mittelohrentzuendung-bei-Kindern.html)
31. Payam Dadvand, Jennifer Parker u. a.: *Maternal Exposure to Particulate Air Pollution and Term Birth Weight: A Multi-Country Evaluation of Effect and Heterogeneity.* In: *Environmental Health Perspectives.* 121, 2013, S. 267–373, doi:10.1289/ehp.1205575.
32. Ole Raaschou-Nielsen, Zorana J Andersen u. a.: *Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE).* In: *The Lancet Oncology.* 14, 2013, S. 813–822, doi:10.1016/S1470-2045(13)70279-1.
33. H. Schuh: *Feinstaub im Hirn.* (http://www.zeit.de/2009/09/Feinstaeube?page=1) Die Zeit, 19. Februar 2009.
34. Lilian Calderón-Garcidueñas, Angélica Gónzalez-Maciel u. a.: *Hallmarks of Alzheimer disease are evolving relentlessly in Metropolitan Mexico City infants, children and young adults. APOE4 carriers have higher suicide risk and higher odds of reaching NFT stage V at ≤ 40 years of age.* In: *Environmental Research.* 164, 2018, S. 475, doi:10.1016/j.envres.2018.03.023.

35. *Studie untermauert These: Schon geringe Feinstaub-Werte steigern offenbar Demenzrisiko*, Tagesspiegel (dpa) vom 12. April 2023
36. *Geringe Feinstaub-Werte steigern das Demenzrisiko*, DIE WELT (dpa) vom 12. April 2023
37. Shiyu Zhang, Lan Chen, Zhengmin (Min) Qian, Dan Li, Miao Cai, Chongjian Wang, Zilong Zhang, Michael G. Vaughn, Amy E. Keith, Haitao Li, Hualiang Lin: *Associations between air pollution and the risk of first admission and multiple readmissions for cardiovascular diseases*. In: *BMJ Heart*. 6. September 2023, ISSN 1355-6037 (https://zdb-katalog.de/list.xhtml?t=iss%3D%221355-6037%22&key=cql), doi:10.1136/heartjnl-2023-322682 (https://doi.org/10.1136/heartjnl-2023-322682), PMID 37673655 (englisch, bmj.com (https://heart.bmj.com/content/early/2023/11/23/heartjnl-2023-322682) [abgerufen am 12. Januar 2024]).
38. Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, abgerufen am 29. Januar 2022. In: *Amtsblatt der Europäischen Union.*
39. *Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub.* (https://web.archive.org/web/20220131102824/https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/8_tab_grenzwerte-feinstaub_2020-10-09.pdf) Umweltbundesamt, 9. Oktober 2020, archiviert vom Original (https://redirecter.toolforge.org/?url=https%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedien%2F384%2Fbilder%2Fdateien%2F8_tab_grenzwerte-feinstaub_2020-10-09.pdf) (nicht mehr online verfügbar) am 31. Januar 2022; abgerufen am 31. Januar 2022.
40. *§ 5 Zielwert, Immissionsgrenzwert, Verpflichtung in Bezug auf die Expositionskonzentration sowie nationales Ziel für die Reduzierung der Exposition für Partikel (PM2,5).* (https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/__5.html) In: *39. BImschV – Gesetze im Internet.* Bundesministerium der Justiz, abgerufen am 29. Januar 2022.
41. *Unterschriftenliste.* (https://web.archive.org/web/20190131215239/https://www.lungenaerzte-im-netz.de/fileadmin/pdf/Stellungnahme__Unterschriftenliste.pdf) (PDF) Archiviert vom Original (https://redirecter.toolforge.org/?url=https%3A%2F%2Fwww.lungenaerzte-im-netz.de%2Ffileadmin%2Fpdf%2FStellungnahme__Unterschriftenliste.pdf) (nicht mehr online verfügbar) am 31. Januar 2019; abgerufen am 28. Januar 2019.
42. *Stellungnahme zur Gesundheitsgefährdung durch umweltbedingte Luftverschmutzung, insbesondere Feinstaub und Stickstoffverbindungen (NOx).* (https://www.lungenaerzte-im-netz.de/fileadmin/pdf/Stellungnahme__NOx_und__Feinstaub.pdf) (PDF) Abgerufen am 28. Januar 2019.
43. Heike Le Ker: *Ärzte bezweifeln Sinn von Grenzwerten: Der Feinstaub-Wirbel*. In: *Spiegel Online*. 23. Januar 2019 (spiegel.de (http://www.spiegel.de/gesundheit/diagnose/fahrverbote-aerzte-bezweifeln-sinn-von-grenzwerten-fuer-stickoxide-und-feinstaub-a-1249519.html) [abgerufen am 28. Januar 2019]).
44. Ansgar Graw: *Feinstaub: Lungenärzte halten EU-weite Grenzwerte für „unsinnig“*. 22. Januar 2019 (welt.de (https://www.welt.de/politik/deutschland/article187525436/Feinstaub-Lungenaerzte-halten-EU-weite-Grenzwerte-fuer-unsinnig.html) [abgerufen am 28. Januar 2019]).
45. Holger Schulz, Stefan Karrasch, Georg Bölke, Josef Cyrys, Claudia Hornberg, Regina Pickford, Alexandra Schneider, Christian Witt, Barbara Hoffmann: *Positionspapier – Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit.* (https://web.archive.org/web/20190128131445/https://pneumologie.de/fileadmin/user_upload/DGP_Luftschadstoffe_Positionspapier_20181127.pdf) (PDF; 1,3 MB) In: *pneumologie.de.* Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin, 27. November 2018, archiviert vom Original (https://redirecter.toolforge.org/?url=https%3A%2F%2Fpneumologie.de%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FDGP_Luftschadstoffe_Positionspapier_20181127.pdf) (nicht mehr online verfügbar) am 28. Januar 2019; abgerufen am 4. Februar 2019.

46. Annette Peters, Barbara Hoffmann, Bert Brunekreef, Nino Künzli, Meltem Kutlar Joss, Nicole Probst-Hensch, Beate Ritz, Holger Schulz, Kurt Straif, Erich Wichmann: *Die Rolle der Luftschadstoffe für die Gesundheit – Eine Expertise im Namen der Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) und der European Respiratory Society (ERS).* (https://web.archive.org/web/20190207014918/http://www.isee-europe.com/uploads/1/1/7/1/117162855/rolle_der_luftschadstoffe_f%C3%BCr_die_geundheit_expertise_isee_ers_final.pdf) (PDF; 527 kB) In: *isee-europe.com.* International Society for Environmental Epidemiology, 30. Januar 2019, archiviert vom Original (https://redirecter.toolforge.org/?url=http%3A%2F%2Fwww.isee-europe.com%2Fuploads%2F1%2F1%2F7%2F1%2F117162855%2Frolle_der_luftschadstoffe_f%25C3%25BCr_die_geundheit_expertise_isee_ers_final.pdf) (nicht mehr online verfügbar) am 7. Februar 2019; abgerufen am 4. Februar 2019.
47. *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über ein Programm „Saubere Luft für Europa“*, abgerufen am 3. Januar 2017 In: EUR-Lex.
48. Christian Baars: *WHO verschärft Empfehlungen zu Luftverschmutzung massiv.* (https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr/who-luftverschmutzung-111.html) In: *tagesschau.de.* 22. September 2021, abgerufen am 12. März 2023.
49. DIN EN 481:1993-09 *Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel (Deutsche Fassung EN 481:1993).* Beuth Verlag, Berlin.
50. M. Mattenklott, N. Höfet: *Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt.* (https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2009_058.pdf) (PDF, 142 KB) Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), April 2009, S. 127–128, abgerufen am 10. Januar 2023.
51. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit: TRGS 900 als pdf zum Download (http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-900.html)
52. Carsten Möhlmann: *Staubmesstechnik – damals bis heute.* In: *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft.* 65, Nr. 5, 2005, ISSN 0949-8036, S. 191–194.
53. *Feinstaub ist gefährlicher als gedacht.* (https://www.psi.ch/de/media/forschung/feinstaub-ist-gefahrlicher-als-gedacht) Paul Scherrer Institut, 19. März 2021, abgerufen am 20. März 2021.
54. *Meeresluft verschlimmert Luftverschmutzung – Chloride fördern Entstehung von Ozonsmog und Feinstaub.* (https://www.scinexx.de/news/technik/meeresluft-verschlimmert-luftverschmutzung/) scinexx, 9. April 2008, abgerufen am 4. Februar 2022 (deutsch).
55. Stephen M. McNamara, Katheryn R. Kolesar, Siyuan Wang, Rachel M. Kirpes, Nathaniel W. May, Matthew J. Gunsch, Ryan D. Cook, Jose D. Fuentes, Rebecca S. Hornbrook, Eric C. Apel, Swarup China, Alexander Laskin, and Kerri A. Pratt: *Observation of Road Salt Aerosol Driving Inland Wintertime Atmospheric Chlorine Chemistry*. In: *ACS Cent. Sci.* Nr. 6, 2020, S. 684–694, doi:10.1021/acscentsci.9b00994 (https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00994) (englisch).
56. Reto Gieré: *Gesundheitsfeinde in der Luft.* (https://www.pr.uni-freiburg.de/publikationen/surprisingscience/UmweltGesundheit/gesundheitsfeinde-in-der-luft/gesundheitsfeinde-in-der-luft) In: *Hochschul- und Wissenschaftskommunikation.* Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, abgerufen am 23. Januar 2022.
57. *BfR schließt Arbeiten zur „Toner“-Problematik mit einer gesundheitlichen Bewertung möglicher Risiken durch Druckeremissionen ab.* (https://www.bfr.bund.de/cm/343/bfr_schliesst_arbeiten_zur_toner_problematik_ab.pdf) (PDF) Gesundheitliche Bewertung Nr. 014/2008 des BfR vom 31. März 2008. Bundesinstitut für Risikobewertung, 31. März 2008, S. 26, abgerufen am 23. Januar 2022.
58. Nadja Podbregar: *Wie Feinstaub aus Luftschadstoffen entsteht.* (https://www.wissenschaft.de/erde-klima/wie-feinstaub-aus-luftschadstoffen-entsteht/) In: *wissenschaft.de.* 15. Mai 2020, abgerufen am 16. Mai 2020.
59. *Aus welchen Quellen stammt Feinstaub?* (https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/aus-welchen-quellen-stammt-feinstaub) Umweltbundesamt, 25. April 2018, abgerufen am 31. Januar 2022.

60. Klaus-Peter Giesen: *Untersuchung des Seesalzanteils an der Feinstaubbelastung auf der Insel Norderney.* (https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/7279) (PDF; 157 KB) Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 27. Mai 2005, abgerufen am 4. Februar 2022.
61. Wilfrid Bach: *Our Threatened Climate*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht (The Netherlands) 1984, ISBN 90-277-1680-3.
62. Experts update ash health advice (http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/8624806.stm), BBC News, 16. April 2010.
63. Richtlinie 99/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft, abgerufen am 4. Februar 2022. In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.* L, Nr. 163, 29. Juni 1999, S. 41–60.
64. Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27. September 1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität, abgerufen am 4. Februar 2022. In: *Amtsblatt.* L, Nr. 296, 21. November 1996, S. 55–63.
65. Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, abgerufen am 4. Februar 2022. In: *Amtsblatt der Europäischen Union.* L, Nr. 152, 11. Juni 2008, S. 1.
66. Thomas Kruchem: *Kaminofen-Boom – Steigende Gesundheitsgefahr durch Feinstaub.* (https://www.swr.de/swr2/wissen/kaminofen-boom-steigende-gesundheitsgefahr-durch-feinstaub-swr2-wissen-2022-11-07-100.html) In: *SWR2.* 7. November 2022, abgerufen am 29. Dezember 2022.
67. Karn Vohra, Alina Vodonos, Joel Schwartz, Eloise A. Marais, Melissa P. Sulprizio, Loretta J. Mickley: *Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem*. In: *Environmental Research*. Band 195, April 2021, S. 110754, doi:10.1016/j.envres.2021.110754 (https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110754) (elsevier.com (https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013935121000487) [abgerufen am 24. Juni 2024]).
68. Manfred Kriener: *Das tödliche Wunder.* (http://www.zeit.de/2009/06/Asbest) In: *Zeit Online.* 29. Januar 2009, abgerufen am 13. Juli 2017.
69. Fragen & Antworten – Asbest (https://web.archive.org/web/20131004231132/http://umweltinstitut.org/fragen--antworten/asbest/asbest-41.html) (Memento vom 4. Oktober 2013 im *Internet Archive*), Umweltinstitut München.
70. Maria Roselli: *Asbest – die Zeitbombe tickt*. In: *Greenpeace Magazin*. Nr. 3, 2010 (greenpeace-magazin.de (https://www.greenpeace-magazin.de/asbest-die-zeitbombe-tickt) [abgerufen am 5. März 2018]).
71. *Feinstaub in Innenräumen.* (https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft/feinstaub-in-innenraeumen) Umweltbundesamt, 14. Juni 2017, abgerufen am 26. März 2024.
72. *Emissionen aus Laserdruckern.* (https://www.bmuv.de/WS549) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 19. April 2023, abgerufen am 26. März 2024.
73. India State-Level Disease Burden Initiative Air Pollution Collaborators: *The impact of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across the states of India: the Global Burden of Disease Study 2017.* (https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2542-5196(18)30261-4) (PDF) The Lancet, 6. Dezember 2018, abgerufen am 26. März 2024 (englisch).
74. Mingyi Wang, Weimeng Kong u. a.: *Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation.* In: *Nature.* 581, 2020, S. 184, doi:10.1038/s41586-020-2270-4.
75. VDI 3894 Blatt 1:2011-09 *Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen; Haltungsverfahren und Emissionen; Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde (Emissions and immissions from animal husbandry; Housing systems and emissions; Pigs, cattle, poultry, horses).* Beuth Verlag, Berlin, S. 37.

76. *Luftqualität und Fahrzeugantriebe.* VDI-Statusreport Dezember 2018, S. 4., aufrufbar unter vdi.de (https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/vdi-statusreport-luftqualitaet-und-fahrzeugantriebe) (Registrierung erforderlich)
77. Europa vor Ort Umwelt: Neue Karten zu Luftverschmutzung. Meldung vom 26. Mai 2011.
78. *European Industrial Emissions Portal.* (https://industry.eea.europa.eu/#/home) In: *europa.eu.* industry.eea.europa.eu, abgerufen am 9. Juni 2024 (englisch).
79. *Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellkategorien.* (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_tab_emi-ausgew-luftschadst_2024-03-27.pdf) Umweltbundesamt, abgerufen am 30. Dezember 2024.
80. *Emission von Feinstaub der Partikelgröße PM2,5.* (https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/emission-von-feinstaub-der-partikelgroesse-pm25#emissionsentwicklung) Tabelle: Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellenkategorien. Umweltbundesamt, 27. März 2024, abgerufen am 29. Dezember 2024.
81. *Feinstaub-Belastung.* (https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#feinstaubkonzentrationen-in-deutschland) Umweltbundesamt, 5. Oktober 2021, abgerufen am 31. Januar 2022.
82. *Feinstaub durch Silvesterfeuerwerk.* (https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub/feinstaub-durch-silvesterfeuerwerk) Umweltbundesamt, 14. Januar 2022, abgerufen am 31. Januar 2022.
83. Feuerwerkskörper produzieren weniger Feinstaub als bisher gedacht (https://www.greenpeace-magazin.de/ticker/feuerwerkskoerper-produzieren-weniger-feinstaub-als-bisher-gedacht-0) Greenpeace Magazin von 20. Juli 2020.
84. *Emissionen und Emissionsminderung bei Kleinfeuerungsanlagen.* (https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/emissionsminderung-bei-kleinfeuerungsanlagen#feinstaub-emissionen-von-kleinfeuerungsanlagen) Umweltbundesamt, 13. April 2023, abgerufen am 5. Oktober 2023: „2021 tausend Tommen PM10: Holz 19,38; Kohle 1,48; Heizöl 0,4; Erdgas 0,04 - PM2,5: Holz 18,35; Kohle 1,32; Heizöl 0,4; Erdgas 0,04“
85. *Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit: Feinstaub aus Kamin und Holzofen.* Hintergrundpapier des Umweltbundesamtes, März 2006.
86. *§ 26 1. BImSchV.* (https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/__26.html) In: *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes.* Bundesjustizministerium, 26. Januar 2010, abgerufen am 31. Januar 2022.
87. Luftverschmutzung: Der offene Kamin, eine Feinstaubschleuder (https://www.welt.de/finanzen/immobilien/article186049860/Luftverschmutzung-Kaminoefen-stossen-mehr-Feinstaub-aus-als-Dieselautos.html) Bericht der Tageszeitung Die Welt vom 24. Dezember 2018, abgerufen am 24. Dezember 2018.
88. *Feinstaubbelastung: Heizen mit Holz: Umweltbundesamt rät davon ab.* (https://www.zdf.de/uri/a24c2818-11cb-4903-9155-a9bf30cc3b4e) Abgerufen am 30. April 2023.
89. Christoph Hüglin, Matthias Gianini und Robert Gehrig Empa, Abt. für Luftfremdstoffe und Umwelttechnik: *Chemische Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub.* (https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/chemische_zusammensetzungundquellenvonfeinstaub.pdf.download.pdf/chemische_zusammensetzungundquellenvonfeinstaub.pdf) (PDF; 5 MB) Bundesamt für Umwelt (BAFU), 16. April 2012, abgerufen am 26. Januar 2022 (deutsch, italienisch, französisch).
90. vgl. *Antwort der Landesregierung auf eine Kleine Anfrage zur schriftlichen Beantwortung: Verbrennung von Gartenabfällen in Deutschland* (https://web.archive.org/web/20181221134656/http://www.spd-lsa.de/tl_files/Datei-Struktur/04_drucksachen/kleine-anfragen/d2896sak.pdf) (Memento vom 21. Dezember 2018 im *Internet Archive*) (PDF) Landtag von Sachsen-Anhalt Drs. 6/2896 vom 17. März 2014, S. 22 ff.
91. *Merkblatt zum Verbrennen von Waldabfällen nach Forstarbeiten.* (https://www.lra-toelz.de/merkblatt-aelf-verbrennen-von-waldabfaellen) (PDF) Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Holzkirchen, April 2016, abgerufen am 30. April 2023.

92. *Interaktive Karte.* (https://thru.de/daten/karte/) Umweltbundeamt, abgerufen am 2. November 2022.
93. Richtlinie 2008/50/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, abgerufen am 24. Mai 2014.
94. *Fifth Annual Report – Impacts monitoring.* (http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/fifth-annual-impacts-monitoring-report-2007-07-07.pdf) (PDF; 2,4 MB) Juli 2007, abgerufen am 9. Januar 2013.
95. siehe oeamtc.at (http://www.oeamtc.at/)
96. K. Siegmann, H.C. Siegmann: *Die Entstehung von Kohlenstoffpartikeln bei der Verbrennung organischer Treibstoffe.* München, 12. Oktober 1999.
97. *Vorsicht Feinstaub: Direkteinspritzende Benzinmotoren in der Kritik* (https://web.archive.org/web/20120924061610/http://motorzeitung.de/news.php?newsid=108530) (Memento vom 24. September 2012 im *Internet Archive*) motorzeitung.de-Internetportal, 23. September 2011.
98. *Deutsche unterstützen Fahrverbote bei Feinstaubalarm* (https://yougov.de/news/2017/01/14/deutsche-unterstutzen-fahrverbote-bei-feinstaubala/), YouGov, 3. – 6. Januar 2017.
99. Gerald Traufetter, Emil Nefzger: *Regierung verschleppt neue Abgaskontrolle bei Autos.* (https://www.spiegel.de/auto/feinstaub-bundesregierung-verschleppt-neue-abgaskontrolle-a-40799717-c142-4d5b-8843-85ee335354ba) In: *Der Spiegel.* 4. September 2020, abgerufen am 5. September 2020.
100. *Regierung verschleppt neue Abgaskontrolle bei Autos.* (https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/medienmitteilungen/anzeige-meldungen.msg-id-87385.html) Bundesamt für Strassen ASTRA, 28. Februar 2022, abgerufen am 7. März 2023.
101. GSF Forschungszentrum für Gesundheit, Feinstaub – Droht Gefahr auch im Innenraum? (https://web.archive.org/web/20111106042147/http://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/FLUGS/PDF/Themen/Innenraeume/Feinstaub.End.pdf) (Memento vom 6. November 2011 im *Internet Archive*) (PDF; 3,3 MB).
102. Epson statt Samsung: Justizministerium ersetzt Laser durch Tinte (http://www.channelpartner.de/channelcenter/drucken_archivieren/2615019/) – Bericht im Fachmagazin „Channelpartner“ vom 19. September 2013.
103. Armin Weiler: *Wegen Feinstaubbelastung: Justizministerium lässt über 4.000 Samsung-Drucker verschrotten.* (https://www.channelpartner.de/a/justizministerium-laesst-ueber-4-000-samsung-drucker-verschrotten,2597674) In: *channelpartner.de.* 30. November 2012, abgerufen am 13. Juli 2017.
104. *Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS).* (https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS.html) Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), abgerufen am 1. Februar 2022.
105. seoul.go.kr (https://web.archive.org/web/20071226231644/http://english.seoul.go.kr/gover/office/speech/1234873_3332.html) (Memento vom 26. Dezember 2007 im *Internet Archive*)
106. *WHO global air quality guidelines.* (https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf#page=8) (PDF, 2,3MB) Executive summary. WHO, 2021, S. 4, abgerufen am 13. Oktober 2024 (englisch).
107. A. Ebel, P. Builtjes, V. Diegmann, H. Elbern, M. Memmesheimer, E. Reimer, R. Stern, B. Vogel, R. Wolke: *Modellierung und Prognose von Feinstaubbelastungen* in „Statuspapier Feinstaub (http://www.dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Statuspapier_Feinstaub.pdf) (PDF; 3,8 MB)“, herausgegeben vom GDCh-/ KRdL-/ ProcessNet-Gemeinschaftsausschuss „Feinstäube“, September 2010, ISBN 978-3-89746-120-8, S. 83–109.
108. J. Tomas: *Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie Partikeltrennung im Fluid.* (https://web.archive.org/web/20131004220249/http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/VO_GPVT/Folien_GPVT_5-p-1402.pdf) (Memento vom 4. Oktober 2013 im *Internet Archive*) (PDF; 4,3 MB). Universität Magdeburg, Vorlesungsfolien.

109. R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber: *Bubbles, Drops and Particles.* Dover Publications, Mineola 1978.
110. P. Bruckmann, R. Gehrig, T. Kuhlbusch, E. Sträter, C. Nickel: *Vorkommen von Feinstäuben und die Maßstäbe ihrer Bewertung* in „Statuspapier Feinstaub (http://www.dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Statuspapier_Feinstaub.pdf) (PDF; 3,8 MB)“, herausgegeben vom GDCh-/ KRdL-/ ProcessNet-Gemeinschaftsausschuss „Feinstäube“, September 2010, ISBN 978-3-89746-120-8, S. 11–38.
111. Walter Roedel, Thomas Wagner: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre.* 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, S. 473–481, doi:10.1007/978-3-642-15729-5_9 (https://doi.org/10.1007/978-3-642-15729-5_9)
112. Walter Roedel, Thomas Wagner: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre.* 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, S. 493–501, doi:10.1007/978-3-642-15729-5_9 (https://doi.org/10.1007/978-3-642-15729-5_9)
113. Richtlinie 80/779/EWG des Rates vom 15. Juli 1980 über Grenzwerte und Leitwerte der Luftqualität für Schwefeldioxid und Schwebestaub, abgerufen am 24. Mai 2014
114. EuGH, Urteil vom 30. Mai 1991 – C-361/88 (http://lexetius.com/1991,255), veröffentlicht bei lexetius.com
115. Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27. September 1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität, abgerufen am 24. Mai 2014
116. Richtlinie 99/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft in der konsolidierten Fassung vom 11. Juni 2008, abgerufen am 24. Mai 2014
117. Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, abgerufen am 9. März 2017
118. *Tempo 90 auf belgischen Autobahnen.* (https://web.archive.org/web/20100211190106/http://www.wort.lu/wort/web/europa_und_welt/artikel/73199/tempo-90-auf-belgischen-autobahnen.php) (Memento vom 11. Februar 2010 im *Internet Archive*) Luxemburger Wort, aktualisiert am 8. Februar 2010.
119. *Alerte à la pollution aux particules fines en Ile-de-France.* (http://www.lemonde.fr/planete/article/2010/02/09/alerte-a-la-pollution-aux-particules-fines-en-ile-de-france_1302956_3244.html) Le Monde, 9. Februar 2010.
120. *Luftreinhalte-Verordnung (LRV) – Immissionsgrenzwerte.* (https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html#app7ahref0) In: *admin.ch.* Abgerufen am 23. Dezember 2019.
121. *Partikelfilter bei Baumaschinen*. (https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/partikelfilter-bei-baumaschinen.html) BAFU, 2009.
122. Hans Ulrich Schaad: *Die Migros Aare lässt es nicht mehr krachen.* (https://www.bernerzeitung.ch/region/bern/die-migros-aare-laesst-es-nicht-mehr-krachen/story/14963513) In: *bernerzeitung.ch.* 29. Dezember 2018, abgerufen am 30. Dezember 2018.
123. Matthias Neuhaus: *Migros verzichtet als Einzige auf Feuerwerksverkauf.* (https://www.nau.ch/news/schweiz/migros-verzichtet-als-einzige-auf-feuerwerksverkauf-66229919) In: *nau.ch.* 28. Juli 2022, abgerufen am 28. Juli 2022.
124. *Umweltfreundliches Feuerwerk – «Ökologisches Feuerwerk soll auch schön sein».* (https://www.srf.ch/kultur/gesellschaft-religion/umweltfreundliches-feuerwerk-oekologisches-feuerwerk-soll-auch-schoen-sein) In: *srf.ch.* 31. Dezember 2019, abgerufen am 31. Dezember 2019.
125. United States Environmental Protection Agency (Hrsg.): *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)* (http://www.epa.gov/air/criteria.html). Stand: 20. Februar 2009, abgerufen am 27. April 2009.
126. *Title 40 of the Code of Federal Regulations Part 50 § 6* (https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/50.6). Stand: 17. Oktober 2006, abgerufen am 27. April 2009.
127. *Title 40 of the Code of Federal Regulations Part 50 § 6* (http://edocket.access.gpo.gov/cfr_2003/julqtr/40cfr50.6.htm). Stand: 22. Dezember 2000, abgerufen am 27. April 2009.

128. United States Environmental Protection Agency (Hrsg.): *Final Revisions to Particulate Matter NAAQS Federal Register Notice* (https://www.federalregister.gov/documents/2006/10/17/06-8477/national-ambient-air-quality-standards-for-particulate-matter), Stand 17. Oktober 2006, abgerufen am 8. Oktober 2012.
129. *Title 40 of the Code of Federal Regulations Part 50 § 7* (https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/50.7). Stand: 30. Juli 2004, abgerufen am 27. April 2009.
130. United States Environmental Protection Agency (Hrsg.): *What is the litigation history of the 1997 PM2.5 standards?* (http://www.epa.gov/pmdesignations/faq.htm#11) In: *Fine Particle (PM2.5) Designations. Frequent Questions.* abgerufen am 27. April 2009.
131. *Supreme Court Docket. November 2000. No. 99-1257* (http://supreme.lp.findlaw.com/supreme_court/docket/2000/novdocket.html#99-1257), abgerufen am 27. April 2009.
132. United States Court of Appeals For the District of Columbia Circuit: *American Trucking Associations v. Environmental Protection Agency. No. 97-1440. No. 97-1441* (http://pacer.cadc.uscourts.gov/common/opinions/200203/97-1440d.txt). Entscheidung vom 26. März 2002, abgerufen am 27. April 2009.
133. Astrid C. John, Thomas A. J. Kuhlbusch, Heinz Fißan, Günter Bröker, Karl-Josef Geueke: *Entwicklung eines PM 10/PM 2.5-Kaskadenimpaktors zur Messung der Emission von Feinstäuben.* In: *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft.* 59, Nr. 11/12, 1999, ISSN 0949-8036, S. 449–454.
134. VDI 2066 Blatt 10:2004-10 *Messen von Partikeln; Staubmessung in strömenden Gasen; Messung der Emissionen von PM_{10} und $PM_{2,5}$ an geführten Quellen nach dem Impaktionsverfahren (Particulate matter measurement; Dust measurement in flowing gases; Measurement of PM_{10} and $PM_{2,5}$ emissions at stationary sources by impaction method).* Beuth Verlag, Berlin, S. 10.
135. DIN EN 12341:2014-08 *Außenluft; Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM_{10}- oder $PM_{2,5}$-Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2014.* Beuth Verlag, Berlin, S. 13.
136. VDI 4300 Blatt 11:2013-12 *Messen von Innenraumluftverunreinigungen; Messstrategie für die Erfassung von luftgetragenen Partikeln im Innenraum; $PM_{2,5}$-Fraktion (Measurement of indoor air pollution; Measurement strategies for determination of airborne particles in indoor environment; Particles $PM_{2,5}$ fraction).* Beuth Verlag, Berlin, S. 14–20.
137. Fritz Baum: *Luftreinhaltung in der Praxis*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 1988, ISBN 3-486-26256-4, S. 11.

Normdaten (Sachbegriff): GND: 4153891-2

Abgerufen von „https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Feinstaub&oldid=252402648“

Diese Seite wurde zuletzt am 19. Januar 2025 um 10:35 Uhr bearbeitet.

Der Text ist unter der Lizenz „Creative-Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen“ verfügbar; Informationen zu den Urhebern und zum Lizenzstatus eingebundener Mediendateien (etwa Bilder oder Videos) können im Regelfall durch Anklicken dieser abgerufen werden. Möglicherweise unterliegen die Inhalte jeweils zusätzlichen Bedingungen. Durch die Nutzung dieser Website erklären Sie sich mit den Nutzungsbedingungen und der Datenschutzrichtlinie einverstanden.

Wikipedia® ist eine eingetragene Marke der Wikimedia Foundation Inc.