

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S4)

DOI 10.25646/11649

Robert Koch-Institut, Berlin

Susanne Breitner-Busch<sup>1,2</sup>,  
Hans-Guido Mücke<sup>3</sup>, Alexandra Schneider<sup>2</sup>,  
Elke Hertig<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ludwig-Maximilians-Universität München  
Institut für medizinische  
Informationsverarbeitung, Biometrie und  
Epidemiologie (IBE)

<sup>2</sup> Helmholtz Zentrum München – Deutsches  
Forschungszentrum für Gesundheit und  
Umwelt

Institut für Epidemiologie

<sup>3</sup> Umweltbundesamt, Berlin  
Abteilung Umwelthygiene

<sup>4</sup> Universität Augsburg  
Medizinische Fakultät

Eingereicht: 22.12.2022

Akzeptiert: 31.03.2023

Veröffentlicht: 06.09.2023

# Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft

## Abstract

**Hintergrund:** Die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen reichen von kurzfristigen Gesundheitseinschränkungen über Krankenhauseinweisungen bis hin zu Todesfällen. Der Klimawandel führt zu einer Zunahme von Luftverschmutzung.

**Methode:** Dieser Beitrag adressiert, auf der Basis ausgewählter Fachliteratur, den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Luftschadstoffen, die gesundheitlichen Effekte von Luftschadstoffen sowie deren Modifikation durch die Lufttemperatur, mit einem Fokus auf Deutschland.

**Ergebnisse:** Schlechte Luftqualität erhöht das Risiko für viele Erkrankungen. Durch den Klimawandel kommt es unter anderem zu einer Zunahme von Perioden extremer Hitze mit gleichzeitig erhöhten Konzentrationen von Luftschadstoffen. Die Wechselwirkungen zwischen Lufttemperaturen und Luftschadstoffen sowie ihre kombinierten Auswirkungen auf den Menschen sind noch nicht ausreichend erforscht. Zum Schutz der Gesundheit sind Grenz-, Ziel- und Richtwerte von besonderer Bedeutung.

**Schlussfolgerungen:** Maßnahmen zur Minderung von Luftschadstoffen und klimawirksamen Gasen müssen verstärkt umgesetzt werden. Als ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung der Luftqualität sollten in Europa strengere Grenzwerte zur Luftreinhaltung festgelegt werden. Notwendige Präventions- und Anpassungsmaßnahmen sollten in Deutschland zeitnah, auch in Hinblick auf klimaresiliente und nachhaltige Gesundheitssysteme, vorangetrieben werden.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

◆ LUFTSCHADSTOFFE · GESUNDHEIT · HERZ-KREISLAUF-ERKRANKUNGEN · ATEMWEGSERKRANKUNGEN · LUFTTEMPERATUR

## 1. Einleitung

Im Verlauf ihres Lebens sind Menschen unterschiedlichen Risikofaktoren ausgesetzt, die sich negativ auf ihre Gesundheit auswirken können. Einige dieser Risikofaktoren wie

z. B. Rauchen und Bewegungsmangel sind durch Änderungen der Verhältnisse (z. B. Werbeverbote für Tabak, Verfügbarkeit von Fahrradwegen), aber auch durch das eigene Verhalten (über den individuellen Lebensstil) beeinflussbar. Andere Risikofaktoren, wie zum Beispiel die Luftverschmut-

zung, sind dagegen hauptsächlich durch Veränderungen der Verhältnisse beeinflussbar, z. B. durch die gesetzliche Festlegung maximal zulässiger Immissionskonzentrationen. Verhaltensänderungen einzelner Menschen können aber ebenfalls dazu beitragen, z. B. durch die bewusste Entscheidung für umweltfreundliche Mobilität, Energie- und Heizsysteme.

Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) leben etwa 99% der Weltbevölkerung in Gebieten, in denen die Luftqualitätsstandards nicht den empfohlenen Richtwerten entsprechen. Laut dem neuesten Bericht „State of the Global Air“ [1], der auf den Ergebnissen der Global Burden of Disease (GBD)-Studie beruht [2], wird geschätzt, dass die Luftverschmutzung im Jahr 2019 für einen von neun Todesfällen weltweit verantwortlich war. Luftverschmutzung zählt somit zu den vier wichtigsten Risikofaktoren für die globale Krankheitslast, nur übertroffen von hohem Blutdruck, Rauchen und schlechter Ernährung. [Infobox 1](#) erläutert die für Deutschland wesentlichen Luftschadstoffe und ihre Quellen.

Betrachtet man die Belastung unter Berücksichtigung des neuen, im Jahr 2021 veröffentlichten Richtwertes der WHO für  $PM_{2,5}$ -Feinstaub in Höhe von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Jahresmittelwert), so sind nahezu 100% der Bevölkerung Deutschlands  $PM_{2,5}$ -Feinstaubwerten oberhalb des Richtwertes ausgesetzt ([Infobox 2](#)). Basierend auf den Ergebnissen aus der GBD-Studie liegt für Deutschland die Krankheitslast durch Luftverschmutzung an zehnter Stelle der Risikofaktoren für den Menschen und gilt auch hier als wichtigster umweltbedingter Risikofaktor [2].

Die Luftqualität unterliegt generell wetter- und witterungsabhängigen sowie saisonalen und zwischenjährlichen

Schwankungen. Die mittleren Luftschadstoffkonzentrationen weisen bei Feinstaub (Particulate Matter, PM) und bei Stickstoffoxiden (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid,  $NO_x$ ) ein deutliches Stadt-Land-Gefälle auf. Die höchsten Belastungen treten in der Nähe ihres Entstehungsortes, in Ballungsräumen und an stark verkehrsbelasteten Orten auf. Windarme Wetterlagen und Inversionswetterlagen, gekennzeichnet durch eine Umkehr des üblichen Temperaturrückgangs mit der Höhe und damit Unterbindung des vertikalen Luftaustausches, können zu einer starken Anreicherung der Luftschadstoffe in der unteren Atmosphäre führen, wohingegen Niederschlagsereignisse meist zu einer Verringerung der Belastung durch Auswaschungsprozesse führen. Hohe Ozonkonzentrationen liegen in Mitteleuropa vor allem in den Frühlings- und Sommermonaten vor, oft in Kombination mit hohen Lufttemperaturen und starker UV-Strahlung, da Ozon photochemisch unter solarer Einstrahlung gebildet wird (s. auch [Baldermann et al.](#) [3] in diesem Sachstandsbericht). Sommerliche, strahlungsreiche Hochdruckwetterlagen stehen daher meist in Verbindung mit hoher Ozon- und Temperaturbelastung [4]. Bei Ozon nehmen die Konzentrationen in der Regel Richtung suburbaner und ruraler Räume hin zu. Die höchsten Belastungen entstehen durch chemische Reaktionen der Vorläuferstoffe des Ozons, den Stickstoffoxiden und flüchtigen Kohlenwasserstoffen, bis auf Ausnahmen außerhalb der Ballungsräume in einiger Entfernung von den Quellen. Die Vorläuferstoffe des Ozons werden mit dem Wind aus der Stadt transportiert, wo sie Zeit haben, zu Ozon zu reagieren. Zusätzlich wird in den Innenstädten ein Großteil des Ozons durch die Reaktion mit Stickstoffmonoxid (NO) aus Autoabgasen sofort wieder abgebaut. Deshalb ist die Ozon-

**Infobox 1****Wesentliche gesundheitsrelevante Luftschadstoffe in der Außenluft in Deutschland**

**Partikuläre Luftschadstoffe:** Diese können natürlichen Ursprungs sein oder durch menschliches Handeln erzeugt werden. Eine wichtige Quelle für partikuläre Luftschadstoffe ist der Kfz-Verkehr. Neben den sogenannten Auspuffemissionen gibt es zudem noch das Aufwirbeln von Staub, Verschleiß von Bremsen und Reifen sowie Abrieb von Straßenoberflächen. Daneben stellen auch Schornsteine von Industrieanlagen und Kraftwerken, Heizanlagen in Haushalten sowie die Landwirtschaft wichtige Quellen dar. Natürliche Quellen für Partikel sind Emissionen aus Vulkanen und Meeren, Wald- und Buschfeuer sowie bestimmte biogene Aerosole, wie zum Beispiel Viren.

Um eine einheitliche Klassifizierung zu ermöglichen, werden die in der Luft vorhandenen Partikel anhand ihres aerodynamischen Durchmessers häufig in folgende Größenkategorien unterteilt:

- ▶ Gesamtstaub (Total Suspended Particles, TSP): Masse aller im Gesamt-Schwebstaub enthaltenen Partikel, dieser Wert wird heute nicht mehr routinemäßig gemessen und reguliert
- ▶ Inhalierbarer Feinstaub: Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer ( $<10\ \mu\text{m}$ ) ist (abgekürzt  $\text{PM}_{10}$ )
- ▶ Grobe Partikel (Coarse PM): Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser  $<10\ \mu\text{m}$ , aber größer als  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $>2,5\ \mu\text{m}$ ) ist ( $\text{PM}_{10-2,5}$ )
- ▶ Lungengängiger Feinstaub: Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser  $<2,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ )
- ▶ Ultrafeine Partikel (UFP): Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser  $<0,1\ \mu\text{m}$  bzw. kleiner als 100 Nanometer ist ( $\text{PM}_{0,1}$ )

Konzentrationen von größeren Partikeln ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{10-2,5}$  und  $\text{PM}_{2,5}$ ) werden üblicherweise als Partikelmasse bestimmt. UFP hingegen tragen zur Feinstaubmasse sehr wenig bei, bestimmen umgekehrt aber die Anzahl der Partikel in der Umgebungsluft. Die geeignete Messgröße für UFP ist deshalb ihre Anzahl pro Volumeneinheit (z. B. Anzahl pro Kubikzentimeter,  $\text{cm}^3$ ).

**Gasförmige Luftschadstoffe:**  $\text{O}_3$ , bodennahes Ozon, wird nicht durch eine Schadstoffquelle freigesetzt, sondern entsteht im Wesentlichen als Folgeprodukt komplexer Umwandlungsprozesse. An diesen Mechanismen sind hauptsächlich flüchtige organische Verbindungen und Stickoxide beteiligt; die Sonneneinstrahlung liefert die Energie für die Bildung von bodennahem Ozon. Daher wird vor allem im Sommer und in anthropogen belasteten Luftmassen besonders viel Ozon erzeugt.

Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) ist ein Spurengas in der Atmosphäre und entsteht als Nebenprodukt bei natürlichen und anthropogenen Verbrennungsprozessen. Die Hauptquellen in der Außenluft sind Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen (für Kohle, Öl, Gas, Holz, Abfälle). Neben der Rolle als Vorläufersubstanz für Ozon ist  $\text{NO}_2$  in der Atmosphäre auch an der Bildung von Feinstaubpartikeln beteiligt.

Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) ist ein Gas, das bei der unvollständigen Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen entsteht. Es bildet sich, wenn bei Verbrennungsprozessen zu wenig Sauerstoff zur Verfügung steht. Entsprechend sind der Straßenverkehr und Feuerungsanlagen die Hauptquellen. Kohlenmonoxid ist auch in Tabakrauch in signifikanten Mengen vorhanden.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind Substanzen, die durch unvollständige Verbrennungsprozesse von organischen Materialien (z. B. Holz, Kohle oder Öl) oder in Lebensmitteln (z. B. beim Grillen oder Braten) entstehen. Hauptquellen sind industrielle Prozesse der Mineralölverarbeitung, der Kohlechemie, der Metallverarbeitung, oder der Energieerzeugung.

belastung in Innenstädten, wo viele Autos fahren, deutlich niedriger als am Stadtrand und in den angrenzenden ländlichen Gebieten.

Luftschadstoffe und klimawirksame Gase sind unterschiedliche Substanzen, weisen aber größtenteils die gleichen Quellen auf. Die Emission von Treibhausgasen (vor

## Unter Fortschreiten des Klimawandels könnten die gesundheitlichen Risiken durch Luftverschmutzung weiter zunehmen.

### Infobox 2 Was sind WHO-Richtwerte?

Eine zentrale Aufgabe der WHO ist die wissenschaftliche Ableitung und Veröffentlichung von Richtwerten zum Schutz der menschlichen Gesundheit: Richtwerte sind numerische Werte, die als Konzentration eines Schadstoffs in einem bestimmten Medium (z. B. Luft, Wasser) mit einer Mittelungszeit (Zeitraum, für den der Richtwert gültig ist) ausgedrückt werden. Es wird davon ausgegangen, dass unterhalb dieser Konzentration keine oder nur minimale gesundheitsschädliche Wirkungen auftreten. Dies gilt unter Berücksichtigung der Genauigkeit und Sicherheit aktuell verwendeter physikalischer, epidemiologischer und medizinischer Mess- und Analyseverfahren, weshalb das Auftreten etwaiger Wirkungen unterhalb eines Richtwertes derzeit nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Richtwerte sind nicht rechtsverbindlich. Vielmehr stellen diese Empfehlungen zum Schutz der menschlichen Gesundheit dar.

allen Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan und Lachgas) ist eine wesentliche Ursache der globalen Klimaerwärmung, die Umwelt und Gesundheit nachhaltig negativ beeinflusst [5, 6]. Der Anstieg der mittleren Lufttemperatur verändert die atmosphärische Zirkulation, das kurzzeitige Wetter- und Witterungsgeschehen, wie auch langfristig das Klima. Änderungen atmosphärischer Transport- und Durchmischungsprozesse nehmen Einfluss auf die physikalisch-chemische Prozesse und auf den Zustand der Luftqualität. Seit Beginn dieses Jahrhunderts wurde festgestellt, dass lufthygienisch relevante Extremwetterereignisse vor allem während der Sommerhalbjahre in Europa und auch in Deutschland zugenommen und sich verstärkt haben. Hierzu zählen insbesondere Perioden extremer Hitze mit gleichzeitig erhöhten Konzentrationen von Luftschadstoffen wie Ozon, die gesundheitliche Effekte auslösen können [7, 8].

Aufgrund des Zusammenhangs der Ozonbildungsprozesse mit der Temperatur wird unter Fortgang des Klimawandels ein Anstieg der Ozonkonzentrationen erwartet, vor allem in Projektionen mit einem starken Klimawandel und nur eingeschränkter Reduktion der Vorläufersubstanzen. Zudem kann sich die Belastung durch Feinstaub (PM<sub>10</sub>) erhöhen, dessen Emissionen sowohl aus anthropogenen als auch natürlichen Quellen stammen können. Der anthropogene Anteil wird durch Verbrennungsprozesse der Industrie und des Verkehrs emittiert. Natürliche Prozesse wie Vegetationsbrände [9] und die Windverfrachtung staubtrockenen Bodens während langanhaltender sommerlicher Trockenheit, wie im Dürresommer 2018 [10], können eine erhebliche Zusatzbelastung der Gesamt(fein)staubemission sein.

In diesem Artikel folgen ein Überblick über die gesundheitlichen Effekte von Luftschadstoffen und deren Wechselwirkung mit der Lufttemperatur, sowie eine Einschätzung zu den relevanten Grenz-, Ziel- und Richtwerten. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für Public Health gesammelt. Die Analyse erfolgt auf Basis der aktuellen Fachliteratur im Rahmen eines narrativen Reviews.

## 2. Gesundheitliche Effekte von Luftschadstoffen

### 2.1 Ein Überblick

Obwohl Luftschadstoffe primär über die Atemwege in den Körper gelangen und damit zunächst ein Gesundheitsrisiko für den Atemtrakt und die Lunge nahelegt, zeigt die Forschung der vergangenen Jahrzehnte, dass das größte attributable Risiko von Luftschadstoffen beim Herz-Kreislauf-System liegt. Die Auswirkungen reichen von kurzfris-

Abbildung 1

**Gesundheitseffekte von Luftschadstoffen**

Quelle: Eigene Darstellung nach European Environment Agency [15] und Thurston et al. [12]

## Die Luftschadstoffbelastung der Außenluft stellt eines der größten umweltbedingten Gesundheitsrisiken dar.

- ①
- ▶ Einflüsse auf das zentrale Nervensystem, z. B. Schlaganfall
  - ▶ Neurodegenerative Erkrankungen, z. B. Demenz
  - ▶ Mentale Gesundheit, z. B. Angstzustände
  - ▶ Kopfschmerzen

- ②
- ▶ Atembeschwerden
  - ▶ Irritationen von Augen, Nase, Rachen

- ③
- ▶ Hautalterung

- ④
- ▶ Atemwegserkrankungen, z. B. chronisch obstruktive Lungenerkrankung
  - ▶ Reduziertes Lungenwachstum
  - ▶ Lungenkrebs
  - ▶ Irritationen, Entzündungen und Infektionen

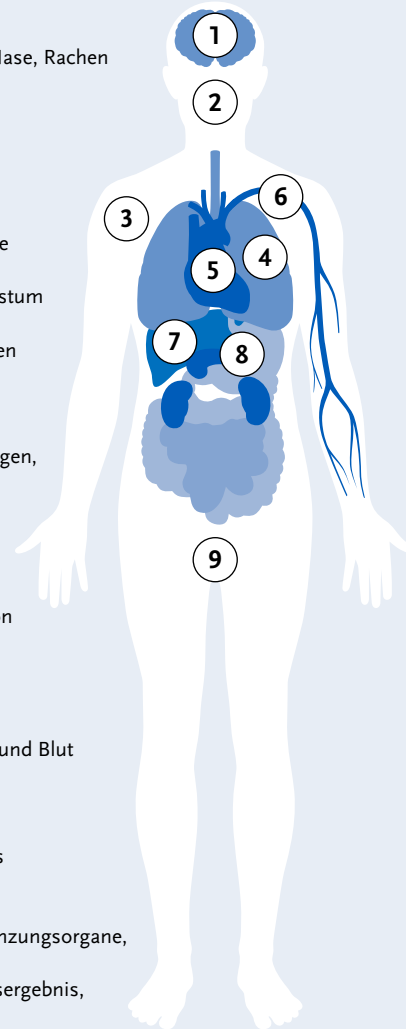
- ⑤
- ▶ Herz-Kreislauf-Erkrankungen, z. B. Herzinfarkt

- ⑥
- ▶ Hypertonie
  - ▶ Endotheliale Dysfunktion
  - ▶ Systemische Inflammation
  - ▶ Erhöhte Blutkoagulation
  - ▶ Tiefe Venenthrombose

- ⑦
- ▶ Einflüsse auf Leber, Milz und Blut

- ⑧
- ▶ Insulinresistenz
  - ▶ Typ-1- und Typ-2-Diabetes

- ⑨
- ▶ Einflüsse auf die Fortpflanzungsorgane, z. B. Spermienqualität
  - ▶ Einflüsse auf das Geburtsergebnis, z. B. Frühgeburt



tigen Gesundheitseinschränkungen über Krankenhauseinweisungen bis hin zu Todesfällen. Diese können akut bei hohen Konzentrationen oder als Konsequenz von Langzeitbelastungen auftreten [11].

Schlechte Luftqualität erhöht das Risiko für Herzerkrankungen, Lungenerkrankungen und Atemwegsinfektionen, Typ-2-Diabetes und weitere gesundheitliche Probleme (Abbildung 1). Die Exposition gegenüber Luftschadstoffen während der Schwangerschaft kann zu einem erhöhten Risiko für Frühgeburten und niedrigem Geburtsgewicht führen. Luftschadstoffe wurden auch mit Asthma und Infektionen der unteren Atemwege bei Kindern in Verbindung gebracht. Diese gesundheitlichen Auswirkungen führen zu Schul- und Arbeitsausfällen, chronischen Krankheiten und Todesfällen. Insgesamt verkürzt die Exposition gegenüber Luftschadstoffen die Lebenserwartung [12–14]. Die Luftverschmutzung ist der mit großem Abstand wichtigste umweltbedingte Risikofaktor für die menschliche Gesundheit.

In Bezug auf die gesundheitlichen Auswirkungen unterscheidet man in der Regel zwischen kurzfristigen Wirkungen hoher Luftschadstoffkonzentrationen, d. h. Wirkungen, die in unmittelbarer zeitlicher Nähe zur Exposition, also innerhalb weniger Tage auftreten, und denjenigen Wirkungen, die langfristig aus einer erhöhten (chronischen) Belastung durch Luftschadstoffe resultieren (z. B. jährliche Durchschnittsbelastungen am Wohnort oder Arbeitsplatz). Kurzfristige Erhöhungen von  $PM_{2.5}$  erhöhen das relative Risiko für akute Herz-Kreislauf-Ereignisse um 1–3 % innerhalb weniger Tage. Längerfristige Expositionen über mehrere Jahre erhöhen dieses Risiko in größerem Ausmaß (ca. 10 %), was teilweise auf die Entstehung und/oder Verschlimmerung von kardiometabolischen Erkrankungen wie

Bluthochdruck und Diabetes mellitus zurückzuführen ist [16]. Durch die Verringerung der Luftverschmutzung könnte die Krankheitslast durch Schlaganfälle, Herzerkrankungen, Lungenkrebs und sowohl chronische als auch akute Atemwegserkrankungen einschließlich Asthma deutlich reduziert werden.

Vor allem kurzzeitig erhöhte Expositionen bergen womöglich für gesunde Menschen ein eher geringes Risiko, doch können subklinische Gesundheitseffekte durchaus als plausibler Vorläufer von schwerwiegenden oder tödlich verlaufenden Ereignissen bei suszeptiblen (empfindlichen) Personen angesehen werden, während wiederholte Expositionen bzw. eine hohe Langzeitbelastung zur Entwicklung von kardiovaskulären und respiratorischen Erkrankungen beitragen können. Die mit der Luftverschmutzung verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen mögen aus medizinischer Sicht z. B. im Vergleich zu anderen Risikofaktoren wie Rauchen oder Übergewicht gering erscheinen, aber auf ganze Bevölkerungen bezogen, sind die Auswirkungen immens.

Trotz der guten Studienlage konnte bisher keine untere Wirkungsschwelle identifiziert werden. Das heißt, dass selbst bei niedriger Exposition die gesundheitlichen Auswirkungen mit ansteigender Luftschadstoffkonzentration zunehmen. Dies wurde unter anderem in einer großen Studie mit mehreren Millionen Teilnehmenden in den USA untersucht. Die Ergebnisse zeigten eine lineare Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen  $PM_{2,5}$  und Mortalität auch weit unterhalb des derzeitigen US-Grenzwertes von  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [17]. Das bedeutet somit im Umkehrschluss: Jede Reduktion der Belastung ist mit einem Gesundheitsgewinn verbunden – sowohl kurz- als auch langfristig [18].

### Potenzielle Mechanismen

Luftschadstoffe werden mit der Atmung über die Atemwege in die Lunge transportiert. Insbesondere  $PM_{2,5}$ -Feinstaub gelangt bis in die kleinsten Atemwege und Lungenbläschen. UFP können außerdem über den Blutkreislauf zu anderen Organen gelangen (Infobox 3). Zusammengefasst können die Partikel-Effekte durch verschiedene Mechanismen

### Infobox 3 Eindringtiefe von Luftschadstoffen

**Partikuläre Luftschadstoffe:** Entsprechend der Größenverteilung, d. h. entlang ihres aerodynamischen Durchmessers, können Aerosolpartikel unterschiedlich tief in den menschlichen Organismus eindringen. Partikel mit aerodynamischen Durchmessern  $> 10 \mu\text{m}$  (Grobstäube) werden bei gesunden Erwachsenen fast ausschließlich in den oberen Atemwegen (Mund, Nase, Rachen) abgeschieden und stellen demzufolge ein geringes Risiko dar. Hingegen kann die Fraktion  $PM_{10}$  bis in den oberen Bereich der Lunge vordringen und wird daher auch als inhalierbarer Feinstaub bezeichnet. Die noch feineren Partikel mit einem aerody-

namischen Durchmesser  $< 2.5 \mu\text{m}$  ( $PM_{2,5}$ ) gelangen bis in die Bronchien und Bronchiolen. Daher wird  $PM_{2,5}$  auch als lungengängiger Feinstaub bezeichnet. UFP können bis zum gasaustauschenden Bereich (Lungenbläschen oder Alveolen) vordringen und vermögen auch in den Blutkreislauf, der den benötigten Sauerstoff im gesamten menschlichen Organismus verteilt, überzugehen. Diese Partikel können somit zu unterschiedlichen Organen des Körpers transportiert werden [20].

**Gasförmige Luftschadstoffe:** Alle gasförmigen Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid dringen in den gesamten Atemtrakt ein und belasten dort die Schleimhäute. Vor allem Ozon kann bei tiefer und häufiger Einatmung bis in die tiefsten Abschnitte der Lunge gelangen.

Tabelle 1

**Mögliche Mechanismen, die den beobachteten Zusammenhang zwischen Luftschadstoffen und Erkrankungen erklären**

Quelle: Eigene Darstellung nach Schulz et al. [23]

Primäre Pfade → → →	Ablaufende Mechanismen → → →	Mögliche Folgen
Inhalierter Partikel rufen persistierenden oxidativen Stress und Abwehrprozesse in Form von schwachen chronischen Entzündungsreaktionen hervor	Freisetzung von Botenstoffen im Lungengewebe, die zu einer systemischen Entzündungsreaktion führt (unter Einbezug der angeborenen und erworbenen Immunabwehr)	Störung der Endothelfunktion; Bildung von Thromben; Fortschreiten von atherosklerotischen Läsionen; eingeschränkte Lungenfunktion; Verschlimmerung von Asthma und COPD; DNA-Schäden; Förderung von Karzinogenese und Metastasierung
Lungengängige Partikel oder sekundäre Mediatoren stimulieren Reflex-Rezeptoren auf der Oberfläche der Lungenbläschen	Ungleichgewicht des vegetativen Nervensystems und somit Beeinflussung der autonomen Kontrolle des Herzens durch Begünstigung des sympathischen Tonus über afferente Nervenbahnen; Oxidation; Alteration von zentralen Signalwegen der Zelldifferenzierung und des Wachstums; mitochondriale Dysfunktion	Einfluss auf die Herzleistung; Herzrhythmusstörungen; Bronchokonstriktion; Schädigungen der Atemwegsschleimhaut; Einschränkung des Selbstreinigungsmechanismus der Bronchien
Direkte Translokation: UFP oder Partikelkomponenten durchdringen die Lungenbläschen und gelangen in den Blutstrom	Direkter Einfluss auf Organe oder Blutbestandteile	Beeinflussung der Viskosität des Blutes; Lokale Entzündungsreaktionen: erhöhte Entzündungswerte und verstärkte Gerinnungsneigung im Blut; Zentrales Nervensystem: Auswirkungen auf den Stoffwechsel und Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinde Achsenaktivierung

COPD = chronisch obstruktive Lungenerkrankung (chronic obstructive pulmonary disease), DNA = Desoxyribonukleinsäure, UFP = ultrafeine Partikel

verursacht werden, die – allein oder gemeinsam – das Risiko besonders für Herz-Kreislauf-Erkrankungen und kardiovaskuläre Ereignisse erhöhen (Tabelle 1) [16, 19–22].

Zudem kann Luftschadstoffexposition zu epigenetischen Veränderungen führen, z. B. zu Veränderungen in der DNA-Methylierung (chemische Abänderung an Grundbausteinen der Erbsubstanz einer Zelle), die denen des epigenetischen Alterns ähneln [16, 21]. Weiterhin konnten Studien zeigen, dass Luftschadstoffe die sogenannten „epigenetic ageing clocks“ beschleunigen können und so die Differenz zwischen chronologischem Alter und dem sogenannten Methylierungsalter vergrößern, wobei eine größere Differenz

mit niedrigerer Lebenserwartung und einem höheren Risiko für altersabhängige Erkrankungen assoziiert ist [16, 21].

Die in Tabelle 1 aufgezeigten Pfade und Mechanismen sind teilweise voneinander abhängig und können kreuzreagieren (z. B. „feed-forward“ oder gegenseitige Verstärkung). Insgesamt wird angenommen, dass direkte Effekte von Partikeln kardiovaskuläre Ereignisse innerhalb von wenigen Stunden auslösen können. Daneben gibt es zunehmend Hinweise, dass Partikel die Entstehung und Progression von atherosklerotischen Läsionen mit befördern, ein möglicher Mechanismus für die beobachteten Langzeiteffekte [20].

## Interaktive Effekte von Luftverschmutzung und Temperatur müssen beachtet werden.

### Suszeptible Bevölkerungsgruppen

Potenzielle Faktoren für die besondere Suszeptibilität (Empfänglichkeit bzw. Empfindlichkeit) gegenüber Luftschadstoffen sind das Lebensalter (Säuglinge, Kinder und ältere Menschen), das Rauchverhalten und andere Lebensstilfaktoren. Insbesondere der Sozialstatus ist ein Faktor, der bei der Untersuchung von Gesundheitseffekten durch Luftverschmutzung eine wichtige Rolle spielt. Er korreliert mit weiteren sozialen und persönlichen Faktoren ebenso wie mit den Umweltbedingungen am Wohnort. Auch besondere Lebensphasen wie Schwangerschaft tragen zur erhöhten Suszeptibilität bei, wobei hier sowohl die werdenden Mütter als auch das noch ungeborene Leben betroffen sind. Ein weiterer wichtiger Faktor sind chronische Vorerkrankungen: So ist die Sensibilität insbesondere bei Kindern und älteren Menschen mit chronischen Atemwegserkrankungen (z. B. Asthma bronchiale, chronisch obstruktive Lungenerkrankung) sowie mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen erhöht und schlägt sich an einzelnen Tagen und vor allem an Episoden mit hoher Außenluftbelastung (z. B. Smog-Situationen) in plötzlicher Verschlimmerung der Grunderkrankungen nieder [20, 23].

### 2.2 Gesundheitliche Effekte von Luftschadstoffen in Interaktion mit hoher Lufttemperatur

Wie oben erwähnt, begünstigt eine hohe Lufttemperatur zusammen mit intensiver Sonneneinstrahlung die Bildung bodennaher Ozonkonzentration durch die Reaktion von Stickoxiden und Wasser. Zudem kann sich die Feinstaubbelastung durch Entstehung von sogenannten sekundären Aerosolen erhöhen [24]. An heißen Tagen besteht

außerdem eine geringe Luftzirkulation, daher können vor allem in den Städten erzeugte Luftschadstoffe nicht abgeführt werden und verbleiben in höherer Konzentration in der Luft. Während Hitzeperioden mit länger anhaltender Trockenheit kommt es zudem häufig zu Waldbränden, die in erheblichem Maß zu hohen Schadstoffkonzentrationen, insbesondere von Feinstaub, beitragen können [25].

Ozon und Feinstaub ( $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$ ) sind daher besonders gesundheitsrelevante Luftschadstoffe während trocken-heißer sommerlicher Hochdruckwetterlagen. Ergebnisse gesundheitsbezogener Studien weisen auf die Evidenz des Einflusses von Luftschadstoffen bei gleichzeitig auftretender Hitze hin, dies betrifft vor allem Menschen in städtischen Ballungsräumen [26, 27]. Die expositionsabhängige Ausprägung gesundheitlicher Wirkungen (parallele Einzelwirkung vs. Kombinationseffekte auf Morbidität und Mortalität) kann wegen der Effektmodifikation und des Zusammenwirkens der Einzelfaktoren untereinander derzeit noch nicht abschließend beurteilt werden und bedarf weiterer Studien [5, 26].

Bisher wurden hohe Lufttemperaturen bzw. Hitzeereignisse und Luftschadstoffe meist getrennt voneinander betrachtet. So haben zwar die meisten Studien bisher die gesundheitlichen Auswirkungen verschiedener Luftschadstoffe untersucht, indem Lufttemperatur als potenzieller Störfaktor berücksichtigt wurde und umgekehrt. Die Wechselwirkungen zwischen hohen Lufttemperaturen, Hitzeereignissen und Luftschadstoffen sowie ihre kombinierten Auswirkungen auf den Menschen sind jedoch noch nicht ausreichend erforscht, insbesondere unter Berücksichtigung des globalen Klimawandels [28, 29].



### Effekte von kurzzeitiger Exposition gegenüber Luftschadstoffen auf die Mortalität – Effektmodifikation durch Hitze

Die meisten der bislang veröffentlichten Studien haben die Veränderung der Auswirkungen von Luftschadstoffen durch die Temperatur untersucht. Die Mehrzahl dieser Studien konnte zeigen, dass hohe Temperaturen die Effekte von Ozon oder Feinstaub auf die (ursachenspezifische) Mortalität verstärken. Allerdings weisen einige Studien auch auf stärkere Effekte von Ozon und Feinstaub bei gleichzeitig niedrigeren Temperaturen hin bzw. zeigen keine Wirkungsänderung der Luftschadstoffe durch Temperatur [30].

### Effekte von kurzzeitiger Exposition gegenüber Hitze auf die Mortalität – Effektmodifikation durch Luftschadstoffe

Im Gegensatz dazu sind die Studien, die untersuchen, ob Luftverschmutzung die Auswirkungen der Temperatur modifiziert, immer noch begrenzt [29, 31]. So wurden z. B. im Nachgang des Hitzesommers 2003 die unabhängigen Effekte und synergistische Wirkung (d. h. ein gemeinsamer Effekt, der größer ist als die Summe der Einzeleffekte) von Hitzewellen (s. auch [Winklmayr et al.](#) [32] in diesem Sachstandsbericht) und Luftschadstoffen auf die tägliche Sterblichkeit in neun europäischen Städten untersucht [8]. Es konnte gezeigt werden, dass das Sterberisiko durch Hitze durch gleichzeitig erhöhte Konzentrationen von Ozon und  $PM_{10}$ -Feinstaub verstärkt wurde. Besonders ältere Menschen waren dabei gefährdet. Eine neue systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse kam zu ähnlichen Ergebnissen: Es wurde eine signifikante Veränderung des Hitzeeffektes auf die Gesamt- bzw. die natürliche Mortalität durch Ozon als auch  $PM_{10}$ -Feinstaub beobachtet, mit

stärkeren Hitzeeffekten an Tagen mit hoher Luftschadstoffbelastung [31]. Diese Effekte wurden auch anhand einer in acht deutschen Städten durchgeführten Vergleichsstudie zur temperaturabhängigen Schwellenwertbestimmung grundsätzlich bestätigt. Danach erscheint bei niedriger Lufttemperatur der Ozoneinfluss auf die Gesamtmortalität größer, hingegen dominiert der Temperatureinfluss während Hitze gleichermaßen wie Ozon [33].

In einer weiteren europäischen Studie konnte zudem gezeigt werden, dass sowohl hohe Lufttemperaturen die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die Gesamtsterblichkeit an natürlichen Todesursachen und auf die Sterblichkeit an Herz-Kreislauf-Erkrankungen modifizieren als auch hohe Konzentrationen von Feinstaub, UFP und Ozon den Effekt der Lufttemperatur verstärken [6].

### Kombinierte Effekte von kurzzeitiger Exposition gegenüber Luftschadstoffen und Hitze auf die Mortalität

Eine US-amerikanische Studie zeigte kürzlich, dass das Sterberisiko in Kalifornien im Zeitraum 2014–2019 an Tagen mit extrem hohen Temperaturen um etwa 6 % und an Tagen mit hohen  $PM_{2,5}$ -Feinstaubkonzentrationen um etwa 5 % anstieg [34]. An Tagen, an denen sowohl extreme Hitze als auch hohe Luftverschmutzung herrschten, stieg das Risiko um 21 % an und war damit höher als die Summe der Einzeleffekte von extremer Temperatur und  $PM_{2,5}$  allein. Katsouyanni et al. [35] stellten ebenfalls fest, dass eine hohe Lufttemperatur den ungünstigen Einfluss von  $PM_{10}$ -Feinstaub auf die Gesundheit verstärkt: In einer warmen Klimaregion bewirkt ein Feinstaubanstieg von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  eine Zunahme der Gesamtmortalität um 0,8 %, hingegen beträgt die Zunahme in kühlerem Klima nur 0,3 %.

### Kurzzeitige Exposition gegenüber Luftschadstoffen und Hitze – Wirkungen auf die Morbidität

In den allermeisten der bisher durchgeführten Studien wurden Auswirkungen des Zusammenspiels von Lufttemperatur und Luftschadstoffen auf die Mortalität untersucht. Dahingegen gibt es nur wenige Studien, die interaktive Effekte bzw. Wirkungsänderungen auf Krankenhauseinweisungen oder andere Morbiditätspunkte untersuchten. So zeigten z. B. Studien aus Australien, China und den USA, dass sowohl hohe Feinstaubkonzentrationen die Effekte von Hitze auf kardiorespiratorische Krankenhauseinweisungen verstärkten als auch hohe Temperaturen die Auswirkungen von Feinstaub beeinflussten; bei Hitze waren die Partikel-Effekte allgemein stärker [36]. Eine neue Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse zu respiratorischen Krankenhauseinweisungen zeigte auch stärkere  $PM_{10}$ -Feinstaub- und Ozon-Effekte bei gleichzeitig hohen Temperaturen [37]. Allerdings zeigten weitere Studien stärkere Effekte von Luftschadstoffen bei gleichzeitig niedrigeren Temperaturen bzw. keine Interaktion oder Effektmodifikation [36].

Andere Studien fanden zudem z. B. Hinweise auf interaktive Effekte von Temperatur und Feinstaub, Ruß bzw. Ozon auf die Lungenfunktion, die Herzrate und Herzratenvariabilität, den Blutdruck und Marker für die Endothelfunktion [29].

### Zusammenspiel von chronischer Belastung durch Luftschadstoffe und Lufttemperatur

Während in den letzten Jahren eine zunehmende Zahl von Arbeiten die gesundheitliche Wirkung des Zusammenhangs von kurzzeitiger Exposition gegenüber erhöhter Lufttemperatur und Luftschadstoffen untersuchte, gibt es bis-

lang nur sehr wenige Studien zum Zusammenspiel von chronischer Belastung durch Luftschadstoffe und Lufttemperatur. Angesichts des sich wandelnden Klimas ist es aber von Bedeutung, auch die längerfristigen Auswirkungen, wie jährliche Durchschnittstemperaturen, und ihr Zusammenspiel mit einer chronischen Luftschadstoffbelastung zu verstehen.

In einer Studie zur Assoziation zwischen chronischer Feinstaubbelastung und Mortalität in 207 amerikanischen Städten zeigte sich, dass die  $PM_{2.5}$ -Effekte besonders in solchen Städten ausgeprägt waren, in denen es im Jahresdurchschnitt wärmer war [38]. Ähnliche Effekte wurden in weiteren US-amerikanischen Studien beschrieben [29].

### 3. Grenz-, Ziel- und Richtwerte im aktuellen Kontext der Luftsituation in Deutschland

Richtwerte stellen Empfehlungen von Expertinnen und Experten aus den relevanten Fachbereichen dar und basieren auf der aktuellen Studienlage zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen (s. Luftqualitätsleitlinie der WHO), während Grenzwerte in Verordnungen und Vorschriften festgelegt sind. Zusätzlich gibt es Zielwerte, die nach Möglichkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums eingehalten werden müssen. Die rechtlichen Grundlagen zum Schutz der menschlichen Gesundheit durch Luftreinhaltung und Beurteilung der Luftqualität sind in [Infobox 4](#) zusammengefasst. Für  $PM_{10}$  liegt der Grenzwert bei  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Tagesmittel (mit 35 zulässigen Überschreitungen im Jahr) und bei  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel. Für die Feinstaubfraktion  $PM_{2.5}$  ist der Grenzwert  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel. Für den gesundheitlich ebenfalls relevanten Ul-

#### Infobox 4 Rechtliche Grundlagen der Luftreinhaltung und Beurteilung der Luftqualität

Die Basis für das Recht über die Luftreinhaltung und Luftqualitätsüberwachung ist durch internationale Abkommen, Richtlinien auf europäischer Ebene und durch Umsetzung dieser in deutsches Recht geschaffen worden. Die Staaten der Europäischen Union (EU) haben einheitliche Regelungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität ausgearbeitet. Grundlage hierfür ist die Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa vom Mai 2008. Mit der 39. Verordnung (39. BImSchV – Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom August 2010) zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG – Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge) wurde die EU-Richtlinie in deutsches Recht umgesetzt. Für die verschiedenen Luftschadstoffe sind Grenz- und Zielwerte verbindlich festgelegt. Zur Vergleichbarkeit der durchgeführten Messungen in den einzelnen Mitgliedstaaten enthält die Richtlinie verbindliche Regelungen über Lage und Mindestzahl der Probenahmestellen, einheitliche Kriterien zu Datenqualitätszielen und Berechnungsvorschriften und Vorgaben für den Bericht der Luftqualitätsbeurteilung an die EU-Kommission. Referenzmethoden zur Beurteilung der verschiedenen Schadstoffkonzentrationen sind hier gleichfalls festgelegt. Jeder Mitgliedstaat berichtet der EU-Kommission zum 30. September eines Jahres über die Luftqualität des Vorjahrs.

Quelle: Wichmann-Fiebig et al. [40]

trafeinstaub existieren derzeit weder Richt-, Ziel- noch Grenzwerte. Für  $\text{NO}_2$  liegen die Grenzwerte bei  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Stundenmittel (18 zulässige Überschreitungen im Jahr) und bei  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel. Für Ozon darf der maximale 8-Stunden-Wert eines Tages an höchstens 25 Tagen pro Kalenderjahr, gemittelt über drei Jahre, den Wert von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  überschreiten. Langfristig sollen die maximalen

8-Stundenmittel den Wert von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gar nicht mehr überschreiten.

Auf Basis zahlreicher neuer wissenschaftlicher Studien hat die WHO 2021 ihre bisherigen Luftqualitätsleitlinie aus 2005 überarbeitet und mit neuen, globalen Empfehlungen und Richtwerten veröffentlicht [39]. Danach wurden für  $\text{PM}_{10}$  Richtwerte von  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Tagesmittel und von  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel abgeleitet, für  $\text{PM}_{2,5}$   $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Tagesmittel und  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel. Für  $\text{NO}_2$  empfiehlt die neue WHO-Leitlinie einen Richtwert von  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Stundenmittel und  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel. Die Richtwerte für Ozon liegen bei  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als höchstes 8-Stundenmittel eines Tages und von maximal  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Mittelwert der sechs Monate mit den höchsten Ozonkonzentrationen.

Um den unterschiedlichen Stand der Luftreinhaltung in den verschiedenen Ländern der Erde zu berücksichtigen, wurden auch sogenannte „Interim targets“, also orientierende Zwischenziele empfohlen, über die ein schrittweiser Entwicklungsprozess bis hin zur Erreichung der genannten WHO-Richtwerte eingeleitet werden sollte. Aus den Empfehlungen der neuen WHO-Luftqualitätsleitlinie folgt auch, dass die derzeit in Deutschland gemessenen Luftschadstoffkonzentrationen sowie die noch gültigen Grenzwerte zu hoch angesetzt sind, um einen effektiven Gesundheitsschutz der Bevölkerung zu gewährleisten. [Abbildung 2](#) zeigt den prozentualen Anteil an Überschreitungen der WHO-Richtwerte und Zwischenziele für die Luftschadstoffe Feinstaub ( $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2,5}$ ), Ozon,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  und CO an den deutschen Messstationen im Jahr 2020. Verschiedene Maßnahmen wurden in Deutschland in der Vergangenheit ergriffen, um die Luftschadstoffkonzentrationen zu verringern. Dabei steht die angestrebte Verminderung und

Abbildung 2

Anteil von Luftqualitätsmessstellen in Deutschland, deren Messwerte des Jahres 2020 die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte (AQG-Level) und Zwischenziele (2021) überschritten (dunkelblaue Ringanteile)

Quelle: Eigene Darstellung nach Wichmann-Fiebig et al. [40]

Schadstoff	PM <sub>2,5</sub>		PM <sub>10</sub>		O <sub>3</sub>		NO <sub>2</sub>		SO <sub>2</sub>	CO
	Jahresmittel	Tagesmittel <sup>1</sup>	Jahresmittel	Tagesmittel <sup>1</sup>	Hochsaison <sup>2</sup>	8-Stundenmittel <sup>1</sup>	Jahresmittel	Tagesmittel <sup>1</sup>	Tagesmittel <sup>1</sup>	Tagesmittel <sup>1</sup>
Interim Target 1	0% > 35 µg/m <sup>3</sup>	0% > 75 µg/m <sup>3</sup>	0% > 70 µg/m <sup>3</sup>	0% > 150 µg/m <sup>3</sup>	3% > 100 µg/m <sup>3</sup>	0,4% > 160 µg/m <sup>3</sup>	1% > 40 µg/m <sup>3</sup>	0% > 120 µg/m <sup>3</sup>	0% > 125 µg/m <sup>3</sup>	0% > 7 mg/m <sup>3</sup>
Interim Target 2	0% > 25 µg/m <sup>3</sup>	0% > 50 µg/m <sup>3</sup>	0% > 50 µg/m <sup>3</sup>	0% > 100 µg/m <sup>3</sup>	100% > 70 µg/m <sup>3</sup>	95% > 120 µg/m <sup>3</sup>	22% > 30 µg/m <sup>3</sup>	21% > 50 µg/m <sup>3</sup>	2% > 50 µg/m <sup>3</sup>	Kein Interim Target
Interim Target 3	0% > 15 µg/m <sup>3</sup>	2% > 37,5 µg/m <sup>3</sup>	0% > 30 µg/m <sup>3</sup>	0% > 75 µg/m <sup>3</sup>	Kein Interim Target		51% > 20 µg/m <sup>3</sup>	Kein Interim Target	Kein Interim Target	Kein Interim Target
Interim Target 4	14% > 10 µg/m <sup>3</sup>	78% > 25 µg/m <sup>3</sup>	5% > 20 µg/m <sup>3</sup>	7% > 50 µg/m <sup>3</sup>	Kein Interim Target		Kein Interim Target		Kein Interim Target	Kein Interim Target
AQG-Level	99% > 5 µg/m <sup>3</sup>	99,5% > 15 µg/m <sup>3</sup>	36% > 15 µg/m <sup>3</sup>	16% > 45 µg/m <sup>3</sup>	100% > 60 µg/m <sup>3</sup>	99,6% > 100 µg/m <sup>3</sup>	83% > 10 µg/m <sup>3</sup>	76% > 25 µg/m <sup>3</sup>	2% > 40 µg/m <sup>3</sup>	0% > 4 mg/m <sup>3</sup>

<sup>1</sup>99. Perzentile <sup>2</sup>8-Stundenmittelwerte eines Tages in den sechs aufeinander folgenden Monaten mit den höchsten Ozonkonzentrationen (hier: April–September)  
AQG-Level=WHO-Luftqualitätsrichtwerte

Vermeidung von schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt durch Luftschadstoffe im Fokus. Mit Einhaltung der vorgeschriebenen Immissionswerte und Emissionshöchstmengen soll die Schadstoffbelastung vermindert werden, wobei die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte keinen vollständigen Gesundheitsschutz bedeutet. Alle EU-Mitgliedstaaten sind

dazu verpflichtet, im Falle von Überschreitungen der EU-Luftqualitätsgrenzwerte aus dem Jahr 2008 nach Gemeinschaftsrecht Luftreinhalte- und Aktionspläne aufzustellen. Die Ergebnisse der aktuellen Luftqualitätsauswertung 2021 zeigen für Deutschland, dass zum Schutz der Gesundheit die Luftschadstoffbelastung durch Feinstaub, NO<sub>2</sub> und Ozon weiter großräumig verringert werden muss [3].

#### 4. Bedeutung für Public Health und Handlungsempfehlungen

Die Klimaprojektionen zeigen, dass der Klimawandel sehr wahrscheinlich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zu einer Zunahme von Extremwetterereignissen und zu Veränderungen im Bereich der Luftschadstoffe mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen wird (s. auch Hertig et al. [41] in diesem Sachstandsbericht). Daher müssen verstärkt sowohl internationale Abkommen als auch nationale Gesetze und ambitionierte Regelungen umgesetzt und eingehalten werden, wie zum Beispiel die Klimaschutzmaßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen des nationalen Klimaschutzgesetzes sowie der in Überarbeitung befindlichen neuen Regelungen zur Luftreinhaltung und zur Reduzierung der Luftschadstoffemissionen. Darüber hinaus gilt es über das in Planung befindliche Klimaanpassungsgesetz für Deutschland zeitnah notwendige Präventions- und Anpassungsmaßnahmen bundesweit vorzubereiten, um einen effektiven Schutz sowie die frühzeitige und vorsorgende Anpassung der Bevölkerung, auch aus gesundheitlicher Sicht, zu ermöglichen und zu gewährleisten.

Um durch Luftschadstoffe hervorgerufene gesundheitliche Belastungen zu vermeiden, sollte auf Ebene der individuellen Verhaltensprävention die Bevölkerung auf längere körperliche Anstrengungen zu den Tageszeiten verzichten, die mit erhöhten Luftschadstoffkonzentrationen einhergehen – dies gilt insbesondere für gesundheitlich vorbelastete Risikopersonen zum Beispiel im Laufe der Mittags- und Nachmittagsstunden während erhöhter Ozonkonzentrationen. Aus Sicht des vorbeugenden Gesundheitsschutzes

sollte im Sinne des „Health in All Policies“-Ansatzes eine integrierte Umwelt-, Wirtschafts-, Verkehrs-, Klima- und Luftreinhaltungspolitik verstärkt für die nachhaltige Einhaltung der Obergrenzen der Konzentrationswerte für Luftschadstoffe Sorge tragen – zumindest der politisch-gesetzlich festgeschriebenen Immissionswerte, am besten jedoch der wissenschaftlich abgeleiteten Richtwerte der neuen WHO-Luftqualitätsleitlinie 2021. Geeignete Maßnahmen sollten den unkontrollierten Anstieg des industriellen und individuellen Energieverbrauchs und den Anstieg der damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen verhindern. Auch der Freisetzung von Ozonvorläufersubstanzen, die im Sommer vermehrt durch den Einsatz von Klimaanlage emittiert werden, sollte vorgebeugt werden.

##### 4.1 Synergien von Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschutz

Die Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas führt neben ihrer klimaschädlichen Wirkung auch zu gesundheitsbeeinträchtigenden Luftverschmutzungen. Deshalb gilt es einerseits zeitnah sowohl die Emissionen von Treibhausgasen systematisch zu reduzieren als auch umfangreiche Energieeinsparmaßnahmen umzusetzen und andererseits auch den Energiebedarf langfristig und dauerhaft aus erneuerbaren Energien zu decken, um die gesundheitlichen Risiken durch Luftverunreinigungen zu senken [42]. Energie-Großverbraucher des Gesundheitssektors, wie stationäre Gesundheitseinrichtungen, laufen im kontinuierlichen 24-Stunden-Betrieb und verursachen gemeinsam mit der ambulanten Leistungserbringung einen jährlichen Rohstoffkonsum von ca. 107 Millionen Tonnen

## Entscheidungstragende sollten Synergien zwischen Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschutz nutzen.

(davon entfallen gut 50% auf Biomasse und fossile Energieträger), wobei etwa ein Drittel aus heimischer Rohstoffentnahme stammen und zwei Drittel auf Importe zurückgehen [43]. Verhältnispräventive Maßnahmen zum Klimaschutz, wie die energetische Sanierung von Krankenhäusern und deren Ersatz durch an den Klimawandel angepasste Neubauten, wie Niedrigenergiegebäude, würden einen erheblichen Beitrag zum aktiven Klimaschutz leisten können und damit auch den Gesundheitsschutz für die Patientinnen, Patienten und Belegschaft in diesen Einrichtungen verbessern. Außer Frage steht, dass die Versorgung der Patientinnen und Patienten oberste Priorität hat und deshalb angesichts zunehmender extremer Hitzeereignisse Anpassungsmaßnahmen der baulich-klimatechnischen Sanierung, der Verschattung, der passiven Gebäudekühlung sowie, so medizinisch notwendig, der spezifischen Einzelraumklimatisierung auf Basis von erneuerbaren Energien zu berücksichtigen sind. Zentrale und koordinierte Maßnahmen des Klimaschutzes für eine deutschlandweite energetische Ertüchtigung bestehender Krankenhausbauwerke fehlen jedoch bislang.

Eine integrierte Umwelt-, Klima- und Gesundheitspolitik sowie ein auf Klimaschutz ausgerichtetes Gesundheitsverhalten können synergistisch wirken und sogenannte Win-win-Situationen oder Health-Co-Benefits von Klimaschutz und Klimaanpassungsmaßnahmen erzeugen. Nachfolgende Beispiele für eine daraufhin ausgerichtete kombinierte Verhältnis- und Verhaltensprävention sind u. a.:

(1) Mobilität: Auf gesonderten und gesicherten Verkehrswegen vermeiden das Fahrradfahren und andere Formen des aktiven Transports durch körperliche Bewegung nicht nur Luftschadstoffemissionen des Kfz-Verkehrs, son-

dern reduzieren als Co-Benefit auch das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, fördern Fitness sowie Gesunderhaltung.

(2) Städtebau: Städtebauliche Maßnahmen wie der Rückbau versiegelter Flächen und der naturnahe Ausbau städtischer Grünflächen bewirken eine Verbesserung der Luftqualität und vermindern zusätzlich durch kühlere Luft und Schatten das Risiko hitzebedingter Gesundheitsschäden. Sie dienen nachweislich den ökologischen Bedarfen einer Stadt sowie der individuellen physischen und mentalen Gesunderhaltung [44].

### 4.2 Klimaresiliente und nachhaltige Gesundheitssysteme

Der deutsche Gesundheitssektor ist nach derzeitigen Schätzungen für gut 5–6,7% der gesamtdeutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich [45, 46]. Diese entstehen zu etwa einem Drittel durch Emissionen aus Heizung und Energieverbrauch von Gesundheitseinrichtungen und zu etwa zwei Dritteln durch vor- und nachgelagerte Prozesse, wie Produktion von Medizinprodukten und Pharmazeutika, Lieferprozesse und Abfallentsorgung. Somit ist der Gesundheitssektor aufgefordert, bei gleichbleibender Versorgungsqualität in der Grundversorgung sowie unter Beibehaltung eines hohen Qualitätsstandards der erbrachten Leistungen seine Treibhausgasemissionen als Klimaschutz- und Luftreinhaltemaßnahme dauerhaft zu minimieren. Allerdings fehlt es in Deutschland bislang an einer nationalen Klimastrategie für das Gesundheitswesen. Eine repräsentative Erhebung zum Stand der Transformation zu einem klimaneutralen und klimaresilienten Gesundheitswesen befragte Führungskräfte sowie Fachärztinnen

## Der Gesundheitssektor ist gefordert, seine Treibhausgasemissionen als Klimaschutz- und Luftreinhaltemaßnahme dauerhaft zu reduzieren.

und Fachärzte zu ihrer persönlichen Einstellung und der Umsetzung von Umwelt-, Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsmaßnahmen sowie zu Barrieren bei deren Implementierung [47]. Die Umfrage zeigte, dass die Relevanz und die Dringlichkeit der Thematik vielen Entscheidungstragenden im Gesundheitssektor bewusst sind. Danach ist sich die große Mehrheit der befragten Ärzteschaft und Führungskräfte einig, dass Maßnahmen zur Bewältigung des Klimawandels in Gesundheitseinrichtungen ergriffen werden müssen. Jedoch fehle es an fachspezifischem Wissen für Klimaschutz und Nachhaltigkeit sowie klarer Verantwortlichkeit auf Führungsebene. Ein wichtiger Faktor für die Umsetzung der Transformation des Gesundheitswesens betrifft die Vermeidung nicht notwendiger Therapien, die sich entlastend auf personelle und schonend auf ökologische Ressourcen auswirken wird. Ferner identifizierte die Studie große Unkenntnis im Hinblick auf konkrete Klimaanpassungsstrategien, zum Beispiel bezüglich der Prävention gegenüber sommerlicher Hitze in Krankenhäusern, als Teil der internen Alarmplanung und Steigerung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen. Als Teil der kritischen Infrastruktur steht das Gesundheitswesen erst am Beginn enormer Herausforderungen, um dessen Anpassungsbedarfe zu eruieren und die Möglichkeiten seiner Widerstandsfähigkeit langfristig zu stärken [45].

Durch das vermehrte Auftreten Klimawandel-assoziiertes physischer und psychischer Erkrankungen, zum Beispiel ausgelöst durch Extremwetterereignisse, kommen neue Herausforderungen auch auf die in den Gesundheitsberufen Tätigen zu. Die Bedeutung des Klimawandels als ein die Gesundheit beeinflussender Faktor ist bislang in der Aus-, Fort- und Weiterbildung der Gesundheitsberufe nicht

oder nur ansatzweise abgebildet. Eine Anpassung und Ergänzung der Weiterbildungsordnungen um entsprechende Inhalte sind zu empfehlen, die es den jetzt, wie auch künftig im Gesundheitswesen Tätigen ermöglichen, angemessen auf die klimabedingten Veränderungen zu reagieren [45].

### 5. Diskussion und Fazit

Insgesamt betrachtet hat sich die lufthygienische Situation in Deutschland in den letzten Jahrzehnten deutlich verbessert, jedoch gelingt es vielen Städten und Regionen bislang nicht, die europaweit gültigen Grenzwerte der Luftschadstoffbelastungen einzuhalten. Aktuelle Studien gehen trotz der Bemühungen zur Luftreinhaltung davon aus, dass die gesundheitlichen Risiken durch Luftverschmutzung künftig weiter zunehmen werden, vor allem in Ballungsräumen und Innenstädten [25]. Grund dafür ist ein nach wie vor hoher bzw. steigender Energieverbrauch durch Prozesse der fossilen Verbrennung. Darüber hinaus kann die Klimaerwärmung die Emissionen von Luftschadstoffen und ihren Vorläuferstoffen zusätzlich indirekt verändern. Neben der Steigerung des Ozonbildungspotenzials kann zunehmende Trockenheit die Feinstaubbelastung erhöhen, z. B. wenn sie Waldbrände befördert oder durch die Deflation ausgetrockneter Böden. Neben diesen Luftschadstoffen könnte die Veränderung der Dauer und Intensität der Pollenbelastung für eine zusätzliche gesundheitliche Belastung von Personen mit allergiebedingten Atemwegs- oder Lungenerkrankungen sorgen [48, 49]. In Bezug auf gesundheitliche Auswirkungen von Luftschadstoffen sind ferner die Interaktionen mit der Lufttemperatur, unter dem fortschrei-

## Reduzierte Grenzwerte zur Luftreinhaltung sind ein essenzieller Schritt zur Verbesserung der Luftqualität in Europa.

tenden Klimawandel spezifisch mit Hitzeereignissen, zu beachten.

Reduzierte Grenzwerte zur Luftreinhaltung in der EU sind ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung der Luftqualität in Europa. Ein Absenken der Werte insbesondere für Feinstaub und  $\text{NO}_2$  wäre ein wichtiger Beitrag zur Reduktion der Krankheitslast der Bevölkerung aufgrund von Luftschadstoffen. Wesentlich wäre zudem die Ausweitung der Luftschadstoffüberwachung, sowohl von regulierten als auch von nicht regulierten Luftschadstoffen, wie UFP, Rußpartikeln und Ammoniak. Eine Verpflichtung zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Luftqualität bis zu den Richtwerten der neuen Luftqualitätsleitlinien der WHO (2021) oder darunter könnte den gesundheitlichen Nutzen für die europäische Bevölkerung maximieren. Luftverschmutzung ist nach wie vor eine der häufigsten Ursachen für Krankheit und Tod, und die durch Luftverschmutzung verursachte Krankheitslast in Europa ist hoch. Dies stellt unter anderem auch eine enorme finanzielle Belastung dar und belastet die Gesundheitssysteme in der gesamten EU. Jede einzelne Person würde von sauberer Luft profitieren; Babys, Kinder, Schwangere, ältere Menschen und Menschen mit Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen gehören dabei zu den am stärksten gefährdeten Bevölkerungsgruppen. Daher brauchen wir eine ambitionierte Luftqualitätsregelung, die Maßnahmen auf allen Ebenen – EU, national, lokal – und in allen Sektoren wie Verkehr, Energie, Industrie, Landwirtschaft und Heizung von Wohngebäuden fördert und unterstützt. Die durch die Veröffentlichung der neuen WHO-Leitlinie initiierten, derzeit diskutierten Vorschläge zur Senkung der EU-Grenz- und -Zielwerte und weiteren Verbesserung der derzeitigen Luft-

qualität enthalten wichtige Schritte zur Erreichung sauberer Luft, aber es bedarf noch größeren Ehrgeizes, um den gesundheitlichen Nutzen für alle zu maximieren. Darüber hinaus wird bessere Luftqualität dazu beitragen, die Einflüsse des Klimawandels und die damit verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen abzumildern. Es ist also umso wichtiger, dass die derzeit diskutierten EU-Werte flächendeckend schon vor 2030 erreicht werden.

Das Zusammenwirken von hohen Lufttemperaturen mit Hitzeereignissen und Luftschadstoffen sowie ihre kombinierten gesundheitlichen Effekte sind jedoch noch nicht ausreichend erforscht, insbesondere unter Berücksichtigung des Klimawandels. Daher ist, neben der Entwicklung geeigneter Anpassungsmaßnahmen, weitere Grundlagenforschung zu den kombinierten Effekten von Luftschadstoffen und Temperatur auf die Gesundheit erforderlich, um ein verbessertes Verständnis der Zusammenhänge zu erlangen. Auch die Wirkung weiterer Multi-Expositionen, wie Luftschadstoff- und thermische Belastung in Kombination mit Pollen- und UV-Belastung ist bisher kaum erforscht. Da die atmosphärischen Umweltexpositionen nicht isoliert auf den Menschen einwirken, sondern der Mensch einem Mix an Umweltfaktoren ausgesetzt ist, ist eine umfassendere Betrachtung unerlässlich.

Im Bereich der Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen sollten ebenfalls Luftschadstoffe, Temperaturexposition sowie Pollen und UV gemeinsam gedacht werden, um effektive Handlungsmaßnahmen zu gestalten und umzusetzen. Dies gilt sowohl für verhaltenspräventive Maßnahmen als auch im Bereich der Verhältnisprävention. So sollte zum Beispiel in Hitzeaktionsplänen nicht nur primär die thermische Belastung adressiert werden, sondern auch



Schutzmaßnahmen vor anthropogenen und biogenen Luftschadstoffbelastungen. Auch bei der Gestaltung städtischer Grünflächen sind, neben dem Ziel der Minderung der thermischen Belastung, Luftschadstoffaspekte sowie weitere Faktoren zur mentalen und physischen Gesunderhaltung der städtischen Bevölkerung wie zum Beispiel Zugänglichkeit und Aufenthaltsqualität zu berücksichtigen. Im Bereich des Gesundheitswesens sollte eine nationale Klimawandelstrategie entwickelt werden, die sowohl die arbeitsmedizinischen Interessen des gesamten Personals und die Belange der Patientinnen und Patienten besonders berücksichtigt als auch die Veränderungen der Luftschadstoffexpositionen in der Bevölkerung beinhaltet. Dies kann nur im Rahmen einer inter- und transdisziplinären Zusammenarbeit gelingen. Programme, die die Luftverschmutzung reduzieren, führen zu großen Gesundheitsvorteilen, die sich über die Zeit verstärken. Die voraussichtlichen Kostenersparnisse der Gesundheitsvorteile durch verbesserte Luftqualität wiegen dabei die Implementierungskosten von Luftqualitätsmaßnahmen bei Weitem auf [50].

#### Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Elke Hertig  
Universität Augsburg, Medizinische Fakultät  
Regionaler Klimawandel und Gesundheit  
Universitätsstr. 2  
86159 Augsburg  
E-Mail: [elke.hertig@med.uni-augsburg.de](mailto:elke.hertig@med.uni-augsburg.de)

#### Zitierweise

Breitner-Busch S, Mücke HG, Schneider A, Hertig E (2023)  
Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare  
Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft.  
J Health Monit 8(S4): 111–131.  
DOI 10.25646/11649

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:  
[www.rki.de/jhealthmonit-en](http://www.rki.de/jhealthmonit-en)

#### Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024). Elke Hertig wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter der Projektnummer 408057478.

#### Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

#### Danksagung

Die Autorinnen und der Autor danken Susanne Göttlicher für die Unterstützung bei der Erstellung von Abbildung 1 und Marcel Langner für die Erstellung der Vorlage für Abbildung 2.

Das RKI-Koordinationssteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maïke Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

#### Literatur

1. Health Effects Institute (2020) State of Global Air 2020. Special Report. Health Effects Institute, Boston, MA. [www.stateofglobalair.org](http://www.stateofglobalair.org) (Stand: 31.03.2023)

2. GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020) Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet* 396(10258):1223–1249
3. Baldermann C, Laschewski G, Groß JU (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch UV-Strahlung. *J Health Monit* 8(S4):61–81.  
[www.rki.de/jhealthmonit](http://www.rki.de/jhealthmonit) (Stand: 06.09.2023)
4. Kessinger S, Minkos A, Dauert U et al. (2022) Luftqualität 2021 – vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt (Hrsg) Hintergrundpapier.  
[www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2021](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2021) (Stand: 31.03.2023)
5. Li J, Woodward A, Hou XY et al. (2017) Modification of the effects of air pollutants on mortality by temperature: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ* 575:1556–1570
6. Chen K, Wolf K, Breitner S et al. (2018) Two-way effect modifications of air pollution and air temperature on total natural and cardiovascular mortality in eight European urban areas. *Environ Int* 116:186–196
7. Vandendorren S, Empereur-Bissonnet P (2005) Health impact of the 2003 heat-wave in France. In: Kirch W, Bertollini R, Menne B (Hrsg) Extreme weather events and public health responses. Springer, Berlin, S. 81–87
8. Analitis A, Michelozzi P, D'Ippoliti D et al. (2014) Effects of heat waves on mortality: Effect modification and confounding by air pollutants. *Epidemiology* 25(1):15–22
9. Kislitsin V, Novikov S, Skvortsova N (2005) Moscow smog of summer 2002. Evaluation of adverse health effects. In: Kirch W, Bertollini R, Menne B (Hrsg) Extreme weather events and public health responses. Springer, Berlin, S. 255–262
10. Minkos A, Dauert U, Feigenspan S et al. (2019) Luftqualität 2018. Umweltbundesamt (Hrsg) Broschüren.  
[www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2018](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2018) (Stand: 31.03.2023)
11. World Health Organization (2013) Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: Technical report. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.  
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/341712> (Stand: 31.03.2023)
12. Thurston GD, Kipen H, Annesi-Maesano I et al. (2017) A joint ERS/ATS policy statement: What constitutes an adverse health effect of air pollution? An analytical framework. *Eur Respir J* 49(1):1600419
13. Newby DE, Mannucci PM, Tell GS et al. (2015) Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. *Eur Heart J* 36(2):83–93b
14. Schulz H, Karrasch S, Bölke G et al. (2019) Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit – Teil I. *Pneumologie* 73(05):288–305
15. European Environment Agency (2022) Health impacts of air pollution.  
[www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution](http://www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution) (Stand: 15.12.2022)
16. Rajagopalan S, Al-Kindi SG, Brook RD (2018) Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. *J Am Coll Cardiol* 72(17):2054–2070
17. Dominici F, Schwartz J, Di Q et al. (2019) Assessing adverse health effects of long-term exposure to low levels of ambient air pollution: Phase 1. *Res Rep Health Eff Inst* 2019(200):1–51
18. Hoffmann B, Brunekreef B, Andersen ZJ et al. (2022) Benefits of future clean air policies in Europe: Proposed analyses of the mortality impacts of PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub>. *Environ Epidemiol* 6(5):e221
19. Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA 3<sup>rd</sup> et al. (2010) Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 121(21):2331–2378
20. Ruckerl R, Schneider A, Breitner S et al. (2011) Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. *Inhal Toxicol* 23(10):555–592
21. Peters A, Nawrot TS, Baccarelli AA (2021) Hallmarks of environmental insults. *Cell* 184(6):1455–1468
22. Schraufnagel DE, Balmes JR, Cowl CT et al. (2019) Air pollution and noncommunicable diseases: A review by the forum of international respiratory societies' environmental committee, part 2: Air pollution and organ systems. *Chest* 155(2):417–426
23. Schulz H, Karrasch S, Bölke G et al. (2019) Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit – Teil III. *Pneumologie* 73(07):407–429

24. Augustin J, Endlicher W, Herrmann A et al. (2023) Gesundheit. In: Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum Berlin Heidelberg, Berlin (im Druck)
25. von Schneidemesser E, Monks PS, Allan JD et al. (2015) Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chem Rev* 115(10):3856–3897
26. Noyes PD, McElwee MK, Miller HD et al. (2009) The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. *Environ Int* 35(6):971–986
27. Hertig E, Russo A, Trigo RM (2020) Heat and ozone pollution waves in Central and South Europe – Characteristics, weather types, and association with mortality. *Atmosphere* 11(12):1271
28. Anenberg SC, Haines S, Wang E et al. (2020) Synergistic health effects of air pollution, temperature, and pollen exposure: A systematic review of epidemiological evidence. *Environ Health* 19(1):130
29. Breitner S, Pickford R, Schneider A (2021) Interaktion von Temperatur und Luftschadstoffen: Einfluss auf Morbidität und Mortalität. In: Günster C, Klauber J, Robra BP et al. (Hrsg) Versorgungs-Report Klima und Gesundheit. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Berlin, S. 105–117
30. Lou J, Wu Y, Liu P et al. (2019) Health effects of climate change through temperature and air pollution. *Curr Pollut Rep* 5(3):144–158
31. Hu X, Han W, Wang Y et al. (2022) Does air pollution modify temperature-related mortality? A systematic review and meta-analysis. *Environ Res* 210:112898
32. Winklmayr C, Matthies-Wiesler F, Muthers S et al. (2023) Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. *J Health Monit* 8(S4):3–34. [www.rki.de/jhealthmonit](http://www.rki.de/jhealthmonit) (Stand: 06.09.2023)
33. Krug A, Fenner D, Mücke HG et al. (2020) The contribution of air temperature and ozone to mortality rates during hot weather episodes in eight German cities during the years 2000 and 2017. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 20(11):3083–3097
34. Rahman MM, McConnell R, Schlaerth H et al. (2022) The effects of coexposure to extremes of heat and particulate air pollution on mortality in California: Implications for climate change. *Am J Respir Crit Care Med* 206(9):1117–1127
35. Katsouyanni K, Touloumi G, Samoli E et al. (2001) Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiology* 12(5):521–531
36. Sillmann J, Aunan K, Emberson L et al. (2021) Combined impacts of climate and air pollution on human health and agricultural productivity. *Environ Res Lett* 16(9):093004
37. Areal AT, Zhao Q, Wigmann C et al. (2022) The effect of air pollution when modified by temperature on respiratory health outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ* 811:152336
38. Kioumourtoglou MA, Schwartz J, James P et al. (2016) PM<sub>2.5</sub> and mortality in 207 US cities: Modification by temperature and city characteristics. *Epidemiology* 27(2):221–227
39. World Health Organization (2021) WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization, Geneva. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> (Stand: 31.03.2023)
40. Wichmann-Fiebig M, Langner M, Dauert U et al. (2022) Considerations on the revision of the Air Quality Directive 2008/50 EU. Scientific Opinion Paper. German Environment Agency, Dessau-Roßlau. [www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/considerations-on-the-revision-of-the-air-quality](http://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/considerations-on-the-revision-of-the-air-quality) (As at 10.06.2023)
41. Hertig E, Hunger I, Kaspar-Ott I et al. (2023) Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023. *J Health Monit* 8(S3):7–35. <https://edoc.rki.de/handle/176904/11074> (Stand: 09.06.2023)
42. Romanello M, Di Napoli C, Drummond P et al. (2022) The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Health at the mercy of fossil fuels. *Lancet* 400(10363):1619–1654
43. Ostertag K, Bratan T, Gandenberger C et al. (2021) Ressourcenschonung im Gesundheitssektor – Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit. Umweltbundesamt (Hrsg) Texte 15/2021. [www.umweltbundesamt.de/publikationen/ressourcenschonung-im-gesundheitssektor](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ressourcenschonung-im-gesundheitssektor) (Stand: 31.03.2023)

44. Böhme C, Franke T, Preuß T et al. (2021) Kooperative Planungsprozesse zur Stärkung gesundheitlicher Belange – Modellhafte Erprobung und Entwicklung von Ansätzen zur nachhaltigen Umsetzung. Teilbericht zur Dokumentenrecherche/-analyse (Arbeitspaket 1). Umweltbundesamt (Hrsg) Umwelt und Gesundheit 06/2021.  
[www.umweltbundesamt.de/publikationen/kooperative-planungsprozesse-zur-staerkung](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kooperative-planungsprozesse-zur-staerkung) (Stand: 31.03.2023)

---

45. Pichler PP, Jaccard IS, Weisz U et al. (2019) International comparison of health care carbon footprints. Environ Res Lett 14(6):064004

---

46. Karliner J, Slotterback S, Boyd R et al. (2019) Health Care's Climate Footprint. How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Health Care Without Harm, Arup.  
[https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint\\_092319.pdf](https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf)  
(Stand: 31.03.2023)

---

47. Baltruks D, Mezger NCS, Schulz CM et al. (2022) Umsetzungsbereitschaft unter Ärzt:innen und Führungskräften für Klimaschutz und Nachhaltigkeit im Gesundheitswesen braucht Unterstützung. Centre for Planetary Health Policy, Berlin.  
<https://cphp-berlin.de/umsetzung-von-klimaschutz-und-nachhaltigkeit-unter-aerztinnen-und-fuehrungskraeften-im-gesundheitswesen-braucht-unterstuetzung/> (Stand: 31.03.2023)

---

48. Wolf M, Ölmez C, Schönthaler K et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021, Teilbericht 5: Klimarisiken in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. Umweltbundesamt (Hrsg) Climate Change 24/2021.  
[www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-5-Wirtschaft-Gesundheit](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-5-Wirtschaft-Gesundheit) (Stand: 31.03.2023)

---

49. Bergmann KC, Brehler R, Endler C et al. (2023). Auswirkungen des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Deutschland. J Health Monit 8(S4):82–110.  
[www.rki.de/jhealthmonit](http://www.rki.de/jhealthmonit) (Stand: 06.09.2023)

---

50. Hoffmann B, Boogaard H, de Nazelle A et al. (2021) WHO air quality guidelines 2021 – Aiming for healthier air for all: A joint statement by medical, public health, scientific societies and patient representative organisations. Int J Public Health 66:1604465

## Impressum

**Journal of Health Monitoring**

[www.rki.de/jhealthmonit](http://www.rki.de/jhealthmonit)

### Herausgeber

Robert Koch-Institut  
Nordufer 20  
13353 Berlin

### Redaktion

Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring  
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung  
General-Pape-Str. 62–66  
12101 Berlin  
Tel.: 030-18 754-3400  
E-Mail: [healthmonitoring@rki.de](mailto:healthmonitoring@rki.de)

### Verantwortlicher Redakteur

Dr. Thomas Ziese  
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

### Redakteurinnen

Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter, Dr. Kirsten Kelleher,  
Dr. Livia Ryl, Simone Stimm

### Satz

WEBERSUPIRAN.berlin, Alexander Krönke

### Bildnachweis

Illustration auf Titel und Marginalspalte:  
© elenabsl – [stock.adobe.com](https://stock.adobe.com)

ISSN 2511-2708

### Hinweis

Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die  
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer  
Creative Commons Namensnennung 4.0  
International Lizenz.



**Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im  
Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit**