

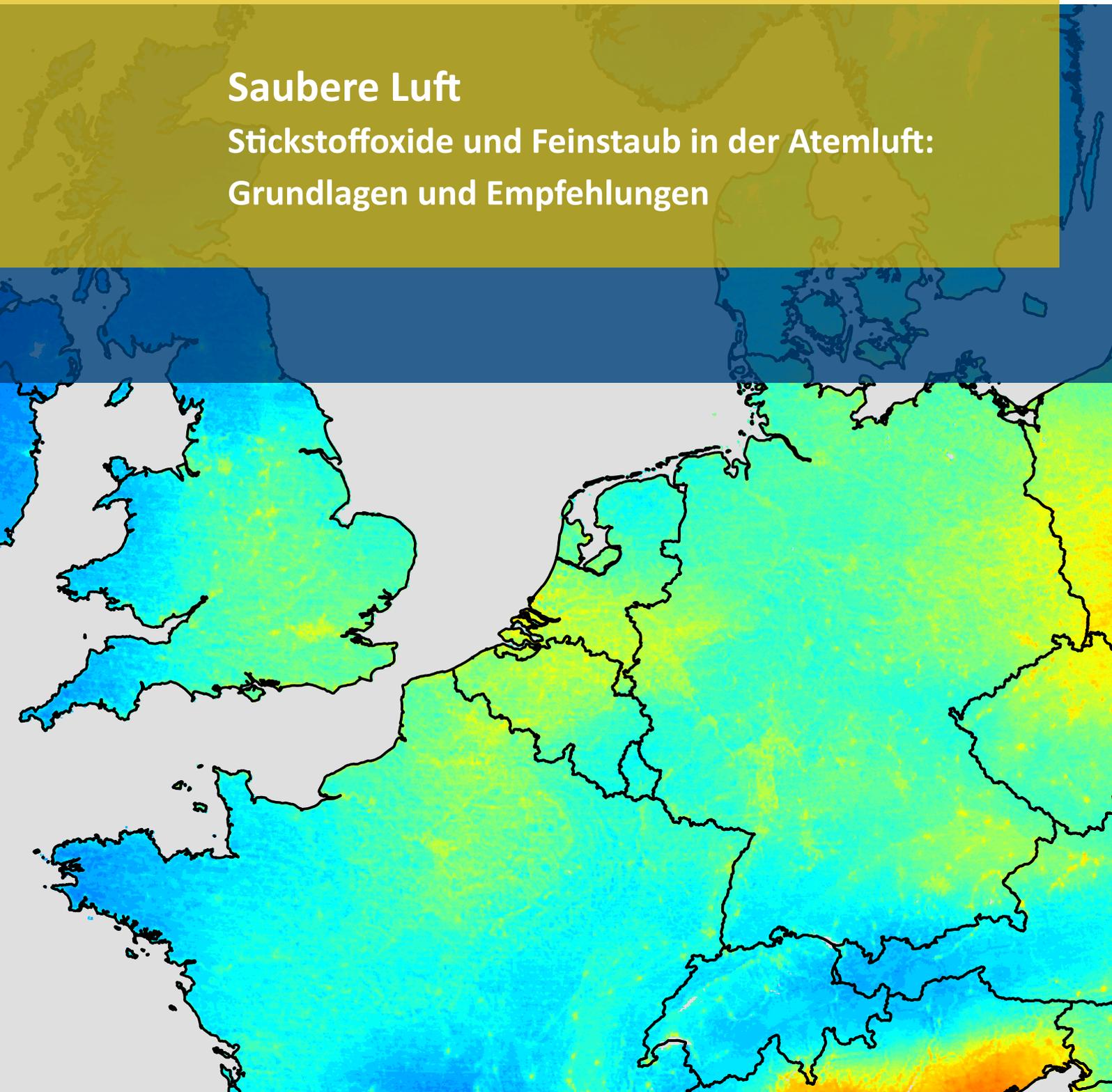


Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

April 2019 | Ad-hoc-Stellungnahme

Saubere Luft

Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen



Impressum

Herausgeber:

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale)

Redaktion:

Lilo Berg Media, Berlin

Koordination:

PD Dr. Stefan Artmann, Präsidialbüro, Leopoldina

Satz:

unicommunication.de, Berlin

Druck:

druckhaus köthen GmbH & Co. KG

1. Auflage

ISBN: 978-3-8047-4012-9

Zitiervorschlag:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2019): Saubere Luft. Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen. Halle (Saale).

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Titelbild:

Feinstaub über Deutschland und angrenzenden Ländern. Das auf Satellitendaten basierende Bild ist ein Ausschnitt aus einer Weltkarte (siehe Seite 58).

Abbildung: Klaus Klingmüller, MPIC Mainz; nach: Van Donkelaar et. al., 2016

Saubere Luft

**Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft:
Grundlagen und Empfehlungen**

Inhalt

Vorwort	4
Die Stellungnahme in Kürze	7
Zentrale Aussagen und Empfehlungen	8
1 Die Schadstoffe.....	12
2 Messungen und Messtechnik.....	18
3 Gesundheitseffekte	25
3.1 Toxikologische Bewertung.....	26
3.2 Epidemiologische Bewertung.....	28
4 Grenzwerte.....	34
5 Rechtlicher Rahmen	41
6 Luftschadstoffe und Verkehr	45
Anhang	55

Vorwort

Extreme Luftverschmutzung bis hin zum Smog kennt man heute vor allem aus Metropolen wie Delhi, Peking oder Kairo. In Europa gehören solche Ereignisse inzwischen der Vergangenheit an. Unvergessen ist der Great Smog von London, der im Winter 1952 rund 12.000 Menschen das Leben kostete. Zehn Jahre später, im Dezember 1962, kam es im Ruhrgebiet zur schlimmsten Smogkrise in Deutschland.

Seither hat sich viel getan. Dank besserer Filtertechnik in den Kraftwerken und der Einführung von Katalysatoren und bleifreiem Benzin für Autos ist der Schadstoffgehalt der Luft in Deutschland stark gesunken. Den Rahmen gab die Politik vor, etwa mit dem Bundesimmissionsschutzgesetz und Grenzwerten für Luftschadstoffe auf nationaler und europäischer Ebene. Smogverordnungen, wie sie einige Bundesländer erlassen hatten, wurden in den 1990er-Jahren gestrichen – sie waren nicht mehr erforderlich.

Heute ist die Luft in Deutschland längst nicht mehr so belastet wie noch vor Jahrzehnten. Zu Überschreitungen der europaweit geltenden Grenzwerte für Schwefeldioxid, Kohlenstoffmonoxid, Benzol und Blei kommt es praktisch nicht mehr. Auch die Belastung mit Feinstaub und Stickstoffdioxid ist rückläufig.

Luftverschmutzung lässt sich, das zeigen die Beispiele, in den Griff bekommen. Dies gilt auch für die weiterhin problematischen Substanzen Stickstoffdioxid, Feinstaub und Ozon, die vor allem in Ballungsräumen und an Orten mit starkem Verkehrsaufkommen Probleme bereiten.

Bei der Bewertung gesundheitlicher Folgen von Luftschadstoffen sind viele Faktoren zu berücksichtigen und auf manche Fragen gibt es noch keine letztgültige Antwort. Dennoch ist der Gesetzgeber gehalten, Grenzwerte für Emission und Belastung festzulegen. Den Rahmen steckt das europaweit gültige Vorsorgeprinzip ab, das denkbare Belastungen für Umwelt und menschliche Gesundheit im Voraus vermeiden oder weitgehend verringern will. Die vorliegende Stellungnahme ergänzt diesen Ansatz, indem sie den zu erwartenden Nutzen in Relation zu den voraussichtlichen gesellschaftlichen Aufwendungen setzt.

Saubere Luft ist ein lebenswichtiges öffentliches Gut. Der Kampf gegen Luftverschmutzung gehört zu den vorrangigen Aufgaben einer verantwortungsvollen Umwelt- und Gesundheitspolitik. Dass in einer hochentwickelten Industriegesellschaft so leidenschaftlich über den richtigen Weg der Luftreinhaltung debattiert wird, wie es gegenwärtig in Deutschland geschieht, ist daher ein gutes Zeichen: Denn nur mit Maßnahmen, die möglichst alle Beteiligten mittragen, wird es gelingen, die hohen Ansprüche an unsere Mobilität und an den Schutz unserer Umwelt langfristig miteinander in Einklang zu bringen.

Im Fokus der aktuellen Debatte stehen der EU-weit einheitliche Grenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂) und die Angemessenheit von kurzfristigen Maßnahmen wie Dieselfahrverboten, um diesen Grenzwert einzuhalten. Diskutiert wird nicht zuletzt die Frage, auf welcher wissenschaftlichen Basis die Festlegung von Grenzwerten für Luftverschmutzung beruht.

Vor diesem Hintergrund hat Bundeskanzlerin Angela Merkel die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina Ende Januar 2019 gebeten, sich im Rahmen ihrer wissenschaftsbasierten Beratung von Politik und Öffentlichkeit mit der Luftverschmutzung insbesondere durch NO₂ und deren gesundheitlichen Folgen auseinanderzusetzen. Im Februar 2019 hat die Leopoldina eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe eingerichtet, die diese Bitte aufnahm.

Die Arbeitsgruppe hat sich zunächst, wie gebeten, mit der wissenschaftlichen Evidenz zur Luftverschmutzung durch Stickstoffoxide (insbesondere NO₂) beschäftigt. Sie betrachtete dieses Thema in Zusammenhang mit der weitaus schädlicheren Belastung der Atemluft durch Feinstäube. Ein noch wichtigerer Aspekt kam hinzu: der Ausstoß von Treibhausgasen, vor allem Kohlenstoffdioxid (CO₂). Alle diese Aspekte galt es integriert zu betrachten, denn Maßnahmen, die aus einem isolierten Blickwinkel sinnvoll erscheinen mögen, können im Ganzen schädlich sein.

Die vorliegende Ad-hoc-Stellungnahme stellt die Ergebnisse der Beratungen in der Arbeitsgruppe vor. Sie umfasst sowohl Informationen zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand als auch Empfehlungen für den weiteren Weg zu einer sauberen Luft.

Herzlich danken wir allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich als Mitglieder der Arbeitsgruppe mit großem persönlichen Einsatz engagiert oder ihre Expertise – sei es in einer Anhörung, sei es schriftlich – zur Verfügung gestellt haben. Die Leopoldina versteht diese Ad-hoc-Stellungnahme als ihren ersten Beitrag zur laufenden Debatte und beabsichtigt, sich verstärkt übergreifenden wissenschaftlichen Fragen der Gestaltung eines sozial, ökonomisch und ökologisch zukunftsfähigen Mobilitätssystems zu widmen.



Martin Lohse
Vize-Präsident
Leiter der Arbeitsgruppe



Sigmar Wittig
Sekretar der Klasse I



Jörg Hacker
Präsident

Die Stellungnahme in Kürze

- ▶ Den rechtlichen Rahmen für die deutsche Luftreinhaltepolitik gibt die 2008 beschlossene EU-Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft in Europa vor. Sie setzt nationalen Maßnahmen einen engen Rahmen.
- ▶ In den vergangenen Jahrzehnten ist die **Schadstoffbelastung der Luft** deutlich zurückgegangen. Das gilt auch für **Stickstoffdioxid** und **Feinstaub**. Dennoch sind bei Stickstoffdioxid immer wieder und bei Feinstaub sehr selten Überschreitungen der geltenden Grenzwerte zu beobachten. Feinstaub entsteht nicht nur aus direkten Emissionen, sondern zu einem wesentlichen Teil auch aus Gasen wie Stickstoffdioxid und Ammoniak; dieser Anteil wird bisher nicht systematisch erfasst.
- ▶ Feinstaub gefährdet die Gesundheit weitaus stärker als Stickstoffdioxid. Angesichts dieser vergleichsweise geringeren Gesundheitsbelastung durch Stickstoffdioxid erscheint eine Verschärfung des geltenden Grenzwerts aus wissenschaftlicher Sicht nicht vordringlich. Dagegen sollte eine weitere **Reduktion der Feinstaubbelastung** angestrebt werden – auch wenn die weniger strengen EU-Grenzwerte für Feinstaub hierzulande eingehalten und zum Teil deutlich unterschritten werden. Dabei muss beachtet werden, dass es viele Quellen für Feinstaub gibt.
- ▶ Um die Luftqualität nachhaltig zu verbessern, sind lokale Maßnahmen und kurzfristiger Aktionismus wenig hilfreich. Sinnvoller ist eine längerfristige Perspektive, die neben dem Straßenverkehr weitere relevante Schadstoffquellen in den Blick nimmt. Ziel sollte eine bundesweite, ressortübergreifende **Strategie zur Luftreinhaltung** sein, die neben Stickstoffoxiden und Feinstaub weitere Schadstoffe und Treibhausgase aus allen Quellen berücksichtigt. Sie soll den Akteuren in Politik und Wirtschaft Orientierung und Hilfestellung geben und Grundlage lokaler und regionaler Luftreinhaltungspläne sein.
- ▶ Straßenverkehr führt zu Belastungen, die über die Luftschadstoffe hinausgehen. Deutschland hat sich zu einer umfassenden **Senkung der Treibhausgasemissionen** verpflichtet. Im Rahmen der Lastenteilungsverordnung der EU ergibt sich für Deutschland ein verbindliches CO₂-Minderungsziel von 38 % bis 2030 für die Sektoren Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft (im Vergleich zu 2005). All diese Gründe sprechen für die rasche Entwicklung eines Konzepts für eine **nachhaltige Verkehrswende**.
- ▶ Die Entwicklung von emissionsarmen Formen der Mobilität wird nicht nur zur Verminderung von verkehrsbedingten Belastungen, sondern auch für die **Wirtschaft von hoher Bedeutung** sein.
- ▶ **Forschungsbedarf** zu Luftschadstoffen besteht hinsichtlich ihrer Erfassung, der Modellierung ihrer Ausbreitung und Wirkungen, zu Gesundheitsbelastungen, vor allem durch ultrafeine Stäube, zu Strategien ihrer Vermeidung sowie zu den mit wünschenswerten Maßnahmen verbundenen gesellschaftlichen Kosten und Nutzen.
- ▶ Die **Leopoldina** wird zur Vorbereitung und Begleitung der vorgeschlagenen Maßnahmen entsprechende Arbeitsgruppen einrichten.

Zentrale Aussagen und Empfehlungen

Zentrale Aussagen

Luftqualität und Luftverschmutzung in Deutschland

- ▶ Saubere Luft ist von grundlegender Bedeutung für ein gesundes Leben. Auch in Deutschland wird die Luftqualität jedoch durch **Schadstoffe** beeinträchtigt. Sie wirken sich nachteilig auf Gesundheit und Umwelt aus.
- ▶ Zur **Belastung** durch Luftschadstoffe tragen neben natürlichen Quellen vor allem Verbrennungsprozesse (Energieversorgung, Haushalt, Verkehr) sowie Landwirtschaft und Industrie bei.
- ▶ Insgesamt ist die **Luftverschmutzung in Deutschland** in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zurückgegangen – bei gleichzeitigem Zuwachs von Verkehr und Industrieproduktion. Verbesserungen der Brennstoffqualität und neue Technologien zur Abgasreinigung leisteten dazu einen maßgeblichen Beitrag. Schwefeldioxid, Kohlenstoffmonoxid und Blei spielen heute als Luftschadstoffe nur noch eine geringe Rolle. Dies zeigt, dass entschlossene Maßnahmen die Luftqualität erheblich verbessern können.
- ▶ **Stickstoffoxide**, insbesondere Stickstoffdioxid (NO₂), und **Feinstaub** gehören neben Ozon zu den weiterhin problematischen Luftschadstoffen. Stickstoffdioxid entsteht im Straßenverkehr vor allem durch Dieselfahrzeuge, die nicht den neuesten Abgasnormen wie Euro-6d-Temp bei PKW entsprechen. Der vom Menschen verursachte Feinstaub stammt überwiegend aus Kraftwerken, Industrie, Landwirtschaft, Straßenverkehr, Öfen und Heizungen. Aus Gasen wie flüchtigen organischen Verbindungen, Stickstoffdioxid, Ammoniak und Schwefeldioxid bilden sich größere Mengen an sekundärem Feinstaub als direkt emittiert werden. Moderne Fahrzeugmotoren, gleich welcher Technologie, tragen relativ wenig zur derzeit gemessenen direkten Feinstaubbelastung bei. Reifen- und Bremsabrieb hingegen sind weiterhin von Bedeutung.

Gesundheitliche Belastungen und Gesundheitsschutz

- ▶ Bei den **gesundheitlichen Belastungen** unterscheidet man generell akute und langfristige Wirkungen. Akute Wirkungen werden experimentell mit relativ hohen Konzentrationen eindeutig definierter Substanzen (toxikologische Studien) sowie in Bevölkerungsstudien unter realen Bedingungen (epidemiologische Studien) untersucht. Langfristige Wirkungen lassen sich durch die epidemiologische Untersuchung unterschiedlich belasteter Personen über längere Zeit erfassen. Es versteht sich, dass die Untersuchungsbedingungen hierbei weniger genau definiert sind, dafür werden Alltagsbelastungen besser erfasst. Aus epidemiologischen Untersuchungen kann man verschiedene, sich gegenseitig ergänzende Maßzahlen für die gesundheitliche Belastung berechnen, zum Beispiel den Verlust von Lebenszeit durch das Einatmen

bestimmter Luftschadstoffe. Unter den Umweltfaktoren, die in Deutschland zu Erkrankungen und Verkürzung der Lebenszeit beitragen, ist Luftverschmutzung der wichtigste.

- ▶ **Stickstoffdioxid** kann bei Asthmatikern auch bei kurzem Aufenthalt in besonders schadstoffbelasteter Umgebung einen Asthmaanfall auslösen. Bei langfristiger Belastung kann Stickstoffdioxid Atemwegserkrankungen wie Asthma hervorrufen. Insgesamt sind die Gesundheitsfolgen bei heute vorkommenden Konzentrationen in der Umgebungsluft geringer als bei Feinstaub. Stickstoffdioxid tritt in der Umwelt zusammen mit anderen verkehrsbedingten Schadstoffen auf, was die Bestimmung isolierter direkter Gesundheitswirkungen erschwert. Es trägt darüber hinaus zur Bildung von Feinstaub und Ozon bei.
- ▶ **Feinstaub** ist deutlich gesundheitsschädlicher als Stickstoffdioxid. Über die Luft kann Feinstaub in die Lunge gelangen, und zwar umso tiefer, je kleiner die Partikel sind. Er kann Sterblichkeit erhöhen und Erkrankungen der Atemwege, des Herz-Kreislauf-Systems und weitere Erkrankungen wie etwa Lungenkrebs verursachen. Ganz feine Partikel (Ultrafeinstaub) können über die Lunge in den Blutkreislauf gelangen und auf diesem Weg weitere Gesundheitsstörungen auslösen.

Grenzwerte und Messung von Luftschadstoffen

- ▶ Zum vorsorglichen Gesundheitsschutz der Bevölkerung legt die Politik **Grenzwerte** für die Schadstoffbelastung der Luft fest, die sich auf wissenschaftliche Erkenntnisse beziehen. Weder für Stickstoffdioxid noch für Feinstaub ist eine exakte Grenzziehung zwischen gefährlich und ungefährlich im Sinne eines Schwellenwerts möglich, unterhalb dessen keine Gesundheitseffekte zu erwarten sind. Das erschwert die Abwägung zwischen vorsorgendem Gesundheitsschutz und gesellschaftlichen Kosten und Belastungen. Die G20-Länder haben für Stickstoffdioxid und Feinstaub unterschiedliche Grenzwerte bestimmt. In der EU gelten für Stickstoffdioxid vergleichsweise strenge, für Feinstaub weniger strenge Grenzwerte.
- ▶ Mit rund 650 **Messstationen** werden Luftschadstoffe deutschlandweit punktuell erfasst. Die Verfahren zur Messung von Stickstoffdioxid und Feinstaub sind genormt, die Aufstellung der Messstationen ist gesetzlich geregelt. Auch innerhalb des gesetzlichen Spielraums können die Messergebnisse sich je nach Ort der Probenahme deutlich unterscheiden. In Ländern außerhalb der EU gelten unterschiedliche Aufstellungsbedingungen, was die weltweite Vergleichbarkeit der Messergebnisse schmälert. Im Interesse zuverlässiger länderübergreifender Vergleiche wäre eine Harmonisierung der Messtechniken und Aufstellungsbedingungen wünschenswert.

Empfehlungen

1. Bei **Stickstoffdioxid** ist der Trend insgesamt rückläufig. Zu **Überschreitungen** des Jahresmittelwerts kommt es derzeit an etlichen viel befahrenen Straßen. In diesem Fall besteht die juristische Verpflichtung, wirksame Gegenmaßnahmen einzuleiten. Angesichts der im Vergleich zu Feinstaub geringeren gesundheitlichen Belastung durch Stickstoffdioxid erscheint eine Verschärfung des entsprechenden Grenzwerts aus wissenschaftlicher Sicht nicht vordringlich. In diesem Zusammenhang ist auch zu bedenken, dass die gegenwärtig im Fokus stehende Stickstoffdioxidbelastung durch die Fahrzeugflottenmodernisierung voraussichtlich binnen fünf

Jahren so stark zurückgehen wird, dass die geltenden Grenzwerte weitgehend eingehalten werden können.

2. Bei **Feinstaub** ist der Trend in Deutschland ebenfalls rückläufig, und zwar seit Jahrzehnten. Hier sollte eine weitere **Reduktion der Belastung** nachdrücklich angestrebt werden – auch wenn die vergleichsweise weniger strengen EU-Grenzwerte für Feinstaub hierzulande eingehalten und zum Teil deutlich unterschritten werden. Zu beachten ist dabei, dass es viele Quellen für Feinstaub gibt.
3. Zu den gesundheitlich **wenig sinnvollen Maßnahmen** zählen kleinräumige und kurzfristige Beschränkungen, die sich gegen einzelne Verursacher von Stickstoffdioxid-Belastungen richten. Dies gilt unter anderem für Straßensperrungen und isolierte Fahrverbote, die zu einer Verkehrsverlagerung in andere Stadtgebiete führen.
4. Die menschliche Gesundheit hängt in hohem Maße von **Umwelt und Klima** ab. Daher sollte das Absenken der Stickstoffdioxidbelastung nicht zum Anstieg klimaschädlicher CO₂-Emissionen beitragen. Ein kompletter Austausch der Dieselflotte durch Fahrzeuge gleicher Gewichtsklasse und gleicher Motorleistung mit Benzinmotoren ist auch aus Klimaschutzgründen nicht empfehlenswert. Um die Gesamtemissionen zu reduzieren, genügt es nicht, die Emissionen pro Fahrzeug zu verringern. Vielmehr sind neue Mobilitätskonzepte vor allem in städtischen Ballungsräumen notwendig.
5. Besonders Erfolg versprechend ist ein **Mix aus kurz- und mittelfristigen Maßnahmen**, die aufeinander abgestimmt sind. Der schnellstmögliche Abschluss geplanter Software-Updates bei Dieselfahrzeugen ermöglicht eine deutliche Reduktion der Stickstoffdioxidbelastung im Stadtverkehr. Beitragen können dazu Hardware-Nachrüstungen, die kurzfristig insbesondere für Busse und Kommunalfahrzeuge sinnvoll sind. Die anzustrebende Reduktion der Gesamtfahrleistung im Individual- und Wirtschaftsverkehr lässt sich durch sozial ausgewogene Änderungen des Steuer- und Abgabensystems sowie höhere Treibstoffpreise beschleunigen. Mittelfristig sind weitere positive Effekte vom Ausbau eines emissionsarmen öffentlichen Verkehrs, einer besseren Verkehrslenkung zur Senkung des Treibstoffverbrauchs und dem konsequenten Austausch älterer Fahrzeuge durch emissionsarme Modelle zu erwarten.
6. Für die weitere Feinstaubreduktion ist nicht nur an den Verkehr zu denken. Es empfiehlt sich daher eine bundesweite, ressortübergreifende **Strategie zur Luftreinhaltung**, die neben Stickstoffdioxid sowie primärem und sekundärem Feinstaub weitere Schadstoffe und Treibhausgase aus allen Quellen berücksichtigt – darunter auch Landwirtschaft und Holzfeuerung.
7. Deutschland hat sich zu einer umfassenden **Senkung der Treibhausgasemissionen** verpflichtet. Der Druck wird im Rahmen der Lastenteilungsverordnung der EU ab dem Jahr 2020 deutlich zunehmen. Für Deutschland ergibt sich daraus ein verbindliches CO₂-Minderungsziel von 38 % bis 2030 (im Vergleich zu 2005) für die Sektoren Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft. Bei Überschreitung der Jahresziele drohen erhebliche Ausgleichszahlungen für den Kauf von Emissionsrechten. Auch aus diesen Gründen ist eine **nachhaltige Verkehrswende** geboten, die systematisch betrieben werden sollte.

8. Für eine solche Verkehrswende wird die verstärkte Entwicklung von **emissionsarmen Fahrzeugen** im Bereich Elektromobilität und alternativen Technologien eine bedeutende Rolle spielen. Notwendige Voraussetzungen sind die Vernetzung verschiedener Verkehrsmittel (öffentlicher Verkehr, PKW, Fahrrad, etc.) sowie der Aufbau entsprechender Infrastrukturen.
9. Eine begleitende **Kosten-Nutzen-Analyse** soll helfen, die gesellschaftlichen Aufwendungen für Interventionen im Blick zu behalten. Eine Stärkung von **Forschung und Entwicklung** zum Thema Luftschadstoffe ist vor allem auf folgenden Gebieten erforderlich: Entstehung, Erfassung und Analyse, Modellierung der Verteilung, Wirkmechanismen der Gesundheitsbelastung, Ultrafeinstaub sowie Strategien der Vermeidung.
10. Auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse hat Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Fortschritte bei der Luftreinhaltung erzielt. Dies stimmt optimistisch, dass weitere Verbesserungen erreichbar sind. Jetzt gilt es, eine **hohe Luftqualität mit mehr Klimaschutz und nachhaltigem Wohlstand** zu verbinden und dafür die Weichen zu stellen.

1. Die Schadstoffe

Erwachsene schöpfen etwa zwanzigtausendmal am Tag Luft, Kinder noch häufiger. Beim Einatmen gelangt lebenswichtiger Sauerstoff in den Körper, beim Ausatmen wird Kohlendioxid abgegeben. Neben 21 % Sauerstoff (O_2) besteht trockene Luft zu 78 % aus Stickstoff (N_2). Luftschadstoffe machen deutlich weniger als 1 % des Luftvolumens aus.

Auch wenn ihr Anteil an der Atemluft sehr gering ist: Luftschadstoffe fallen ins Gewicht. Insgesamt bringen die in Deutschland pro Jahr freigesetzten Luftschadstoffe mehr als fünf Millionen Tonnen auf die Waage. Dazu gehören unter anderem Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxide, Ammoniak, Schwefeldioxid, flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) sowie Feinstaub (PM, für das englische Particulate Matter). Die hier im Fokus stehenden Schadstoffe Stickstoffdioxid und Feinstaub spielen in dem Mix eine wichtige Rolle. Die Emissionsstatistik beruht auf Daten, die vom Umweltbundesamt (UBA) im Austausch mit Behörden, Verbänden und Unternehmen ermittelt werden (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1.: Schadstoffemissionen in Deutschland im Jahr 2016 (Quelle: Umweltbundesamt, 2018).

Schadstoff	CO	NO _x	NH ₃	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	Ruß
in 1000 Tonnen	2.858	1.217	663	356	203	101	14

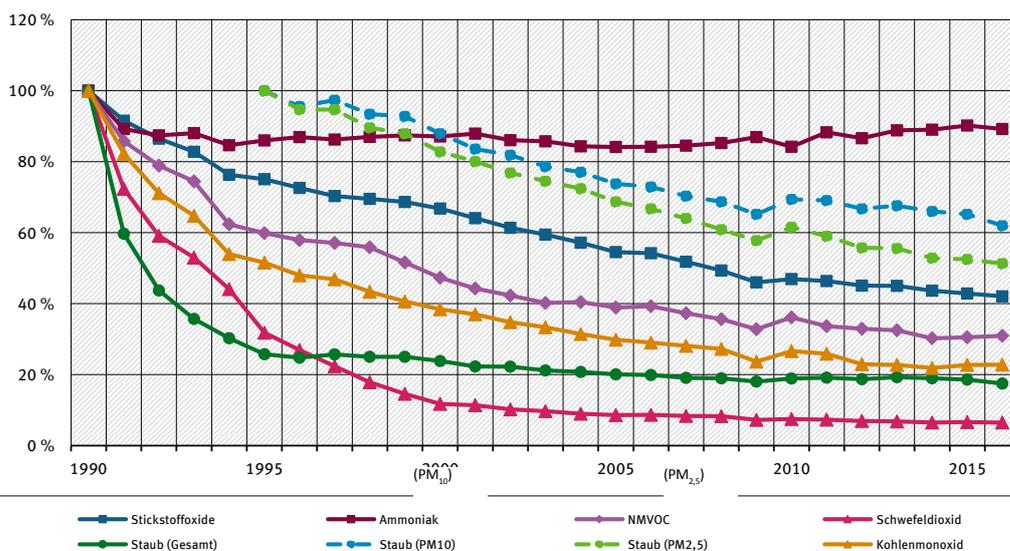


Abbildung 1.1: Veränderung der Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe in Deutschland (Veränderung seit den Basisjahren 1990 beziehungsweise 1995 in Prozent; Quelle: Umweltbundesamt, 2018).

Zur Luftbelastung mit Schadstoffen tragen besonders Verbrennungsprozesse in der Energiewirtschaft und im Verkehr bei. So stammen Stickstoffoxid- und Feinstaubemissionen zum großen Teil aus dem Straßenverkehr sowie aus Kohlekraftwerken; zu

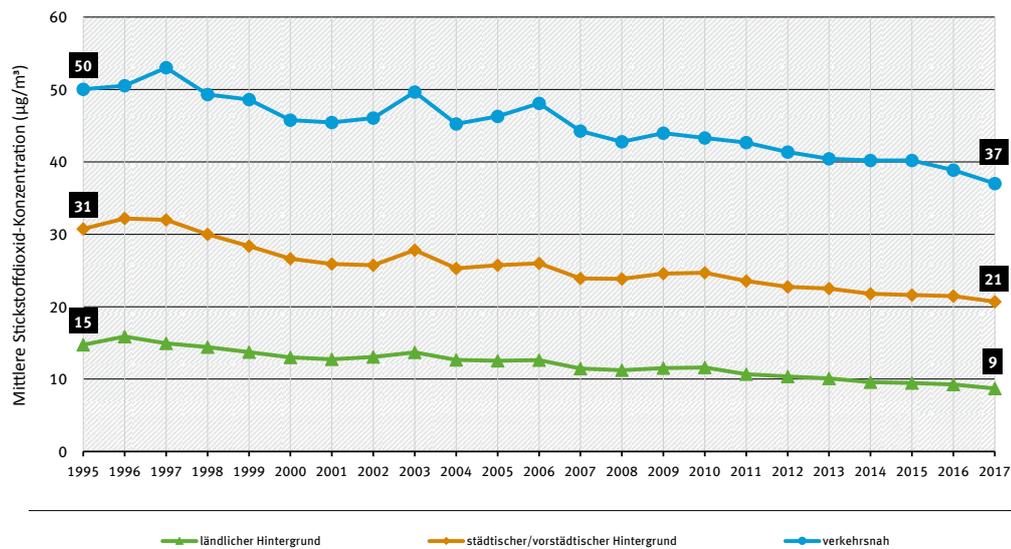


Abbildung 1.2: Entwicklung der Jahresmittelwerte für Stickstoffdioxid für verschiedene Umgebungen. Die Werte wurden jeweils über verschiedene Stationen gemittelt. Zu lokalen Überschreitungen bei einzelnen Stationen siehe Abbildung 2.2 (Quelle: Umweltbundesamt, 2019).

Emissionen von Stickstoffoxiden tragen auch Gaskraftwerke bei. Schwefeldioxid-Emissionen gehen hauptsächlich auf die Kohleverbrennung zurück. Ammoniak wird vor allem durch die Landwirtschaft freigesetzt, NMVOC durch die Industrie. Auch aus natürlichen Quellen wie der Vegetation, Böden und Gewässern werden Spurengase und Feinstaubpartikel freigesetzt.

Insgesamt sind die Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland mit Ausnahme von Ammoniak seit Jahren rückläufig (Abbildung 1.1). Negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben jedoch weiterhin Feinstaub ($PM_{2,5}$) sowie Stickstoffdioxid (NO_2) und Ozon (O_3). Ozon wird nicht als Schadstoff ausgestoßen, sondern kann sich in der Atmosphäre aus flüchtigen organischen Verbindungen und Stickstoffoxiden bilden und wird daher als sekundärer Schadstoff betrachtet.

Der Sammelbegriff **Stickstoffoxide** (NO_x) fasst die beiden Gase Stickstoffmonoxid (NO) und **Stickstoffdioxid** (NO_2) zusammen. Stickstoffmonoxid ist ein farbloses, reaktives Gas. Es wird vor allem bei Verbrennungsprozessen gebildet und ist ein wertvolles Zwischenprodukt in der chemischen Industrie. In kleinen Mengen kommt es auch als Botenstoff im menschlichen Körper vor, wo es unter anderem den Durchmesser der Blutgefäße bestimmt. Stickstoffdioxid (NO_2) ist ein rotbraunes, stechend riechendes Gas, das durch Reaktion von NO mit Sauerstoff (O_2) oder **Ozon** (O_3) gebildet wird.

Kasten 1.1: Stickstoffoxide aus dem Auspuff

Die Gase Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) entstehen bei Verbrennungsprozessen, etwa von Gas und Kohle in der Energiewirtschaft und von Kraftstoffen im Verkehr. Der Luftstickstoff (N_2) wird dabei durch chemische Reaktionen bei sehr hoher Temperatur gespalten, indem atomarer Sauerstoff mit Stickstoff zu Stickstoffmonoxid (NO) reagiert. Im Abgas eines Ottomotors kann mit Hilfe des bewährten Dreiwegekatalysators oder mit einem Speicherkatalysator NO durch Reaktion mit gleichzeitig anwesendem Kohlenmonoxid (CO) und Rest-Kohlenwasserstoffen direkt in N_2 und CO_2 umgewandelt werden. Beim Dieselmotor herrschen andere Verbrennungsbedingungen (Druck, Temperatur, inhomogene Kraftstoffmischung, Überschuss von O_2), sodass insbesondere aufgrund der hohen Konzentration von O_2 im Abgas vor allem die aufwändige Technik mit wässriger Harnstofflösung zur Reduktion von NO_x genutzt wird.

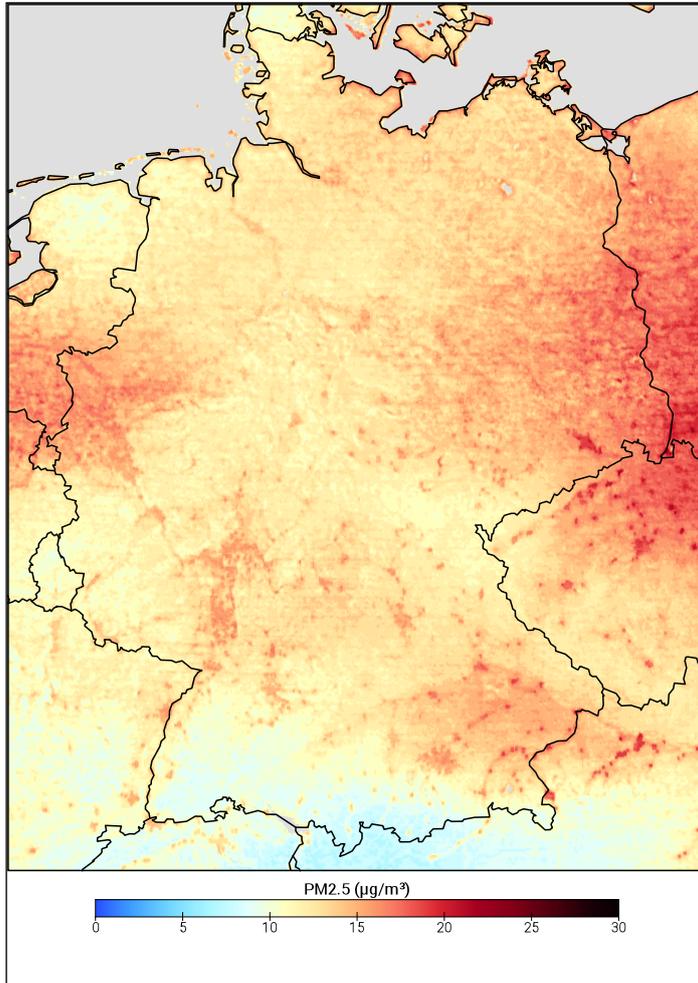


Abbildung 1.3:

Regionale PM_{2.5}-Feinstaubbelastung im Jahr 2016 basierend auf Boden- und Satellitenmessungen (Quelle: Van Donkelaar et al., 2016) In der EU liegt der Grenzwert für die mittlere Jahresbelastung bei 25 µg/m³.

Stickstoffoxide stehen in reger Wechselwirkung mit anderen Schadstoffen. Durch chemische Umwandlungen in der Atmosphäre und Reaktion mit Ammoniak kann sich beispielsweise Ammoniumnitrat bilden, das als Sekundäraerosol erheblich zur Feinstaubbelastung beiträgt. Darüber hinaus begünstigen Stickstoffoxide und flüchtige organische Verbindungen die Entstehung von bodennahem **Ozon** und Smog.

Wie in Abbildungen 1.1 und 1.2 dargestellt, konnten die Stickstoffdioxid-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in Deutschland seit 1990 deutlich reduziert werden. Ermöglicht haben dies neue industrielle Techniken der Verbrennungsführung wie zum Beispiel Temperaturabsenkung durch Abgasrückführung sowie magere und gestufte Verbrennung. Aber auch die Abgasnachbehandlung in Fahrzeugen und Großfeuerungsanlagen durch Katalysatoren zur chemischen Zersetzung von Stickstoffoxiden hat maßgeblich zum rückläufigen Trend beigetragen, der sich jedoch in jüngster Zeit verlangsamt hat.

Feinstaub besteht aus einem komplexen Gemisch von organischen und anorganischen Substanzen, darunter Säuren, Salze, Ruß und schwerflüchtige organische Verbindungen, die als Aerosole in der Luft schweben. Die Partikel sind mit Durchmessern im Bereich von wenigen Millionstel Meter (Mikrometer, µm) mit bloßem Auge nicht erkennbar. Feinstaub der Größenklasse PM_{2.5} enthält Partikel mit aerodynamischen Durchmessern bis etwa 2,5 µm (siehe auch Kapitel 2). Die Größenklasse PM₁₀ enthält zusätzlich größere Partikel bis etwa 10 µm. Zum Vergleich: Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von etwa 100 µm. Als Ultrafeinstaub werden Partikel mit einem Durchmesser bis etwa 0,1 µm bezeichnet; er ist in den Größenklassen PM₁₀ und PM_{2.5} mit enthalten, wird aber bei Routinemessungen bisher nicht gesondert erfasst.

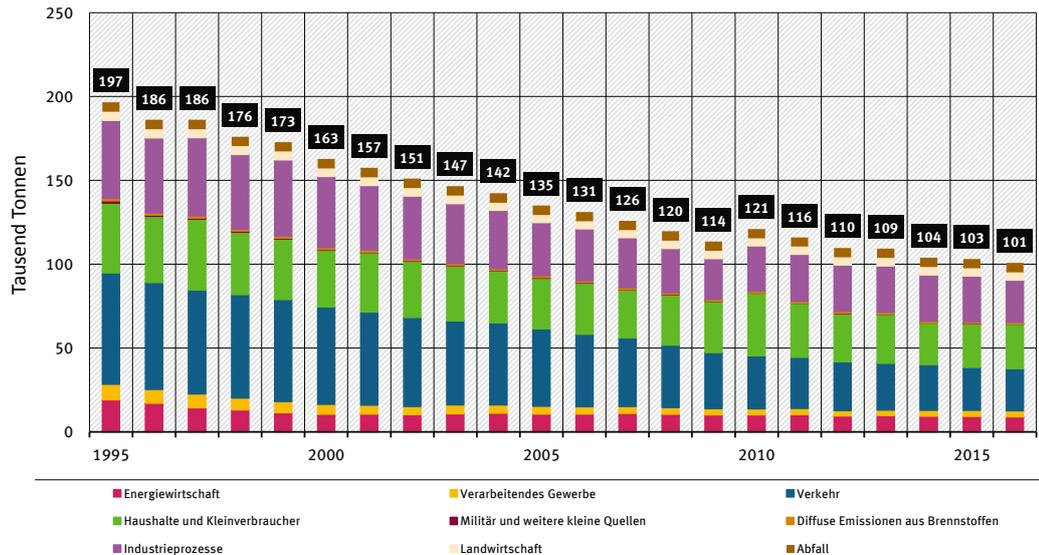


Abbildung 1.4: Veränderung der direkten Emissionen (Primäremissionen) von Feinstaub ($PM_{2,5}$) nach Quellen. Zu beachten ist, dass die Sekundäraerosolbildung in der Atmosphäre, die für einen größeren Anteil der $PM_{2,5}$ -Belastung verantwortlich ist, hier nicht erfasst ist (Quelle: Umweltbundesamt, 2018).

Zur Untersuchung und Charakterisierung der Feinstaubbelastung sowie der damit verbundenen atmosphärischen Prozesse verwendet man bodengestützte Messstationen (siehe Kapitel 2), Flugzeugmessungen, Satellitenbeobachtungen und Chemie-Transport-Modelle. Abbildung 1.3 zeigt die aus Boden- und Satellitenmessdaten bestimmte regionale Verteilung der $PM_{2,5}$ -Belastung in Deutschland (Jahresmittel 2016).

Direkte, auch als primär bezeichnete, Feinstaubemissionen stammen vor allem aus Verbrennungsprozessen in Kraftwerken, Müllverbrennungsanlagen, Motoren und privaten und industriellen Feuerungsanlagen (Abbildung 1.4). Durch Partikelfilter lassen sie sich weitgehend aus dem Abgas entfernen. Den direkten Partikeleintrag erhöht zudem der Abrieb von Bremsen und Reifen von Kraftfahrzeugen aller Antriebsarten. Zur Emission von primären Feinstaubpartikeln trägt auch die Landwirtschaft bei. Darüber hinaus entstehen durch Ammoniak-Emissionen beim Düngen und Ausbringen von Gülle sowie durch chemische Reaktionen von NMVOC in der Atmosphäre sekundäre Aerosole, die deutlich mehr als die Hälfte der $PM_{2,5}$ -Belastung in Deutschland ausmachen. Zudem gelangt Feinstaub aus erodierenden Böden und Wüsten, von Vulkanen und anderen natürlichen Quellen in die Luft, in der auch Teile von Pflanzen, Viren, Bakterien und Pilzsporen schweben.

Die in Abbildung 1.4 gezeigte Abnahme direkter Emissionen von $PM_{2,5}$ bezieht sich im Wesentlichen auf Industrieprozesse und Verkehr; die Beiträge anderer Quellen bleiben etwa konstant. Dabei ist zu beachten, dass die in Abbildung 1.4 dargestellten direkten Emissionen von $PM_{2,5}$ insgesamt deutlich geringer sind als die Sekundäraerosolbildung in der Atmosphäre, die für einen größeren Anteil der $PM_{2,5}$ -Belastung verantwortlich ist (mehr als 50 %). Dabei werden andere Luftschadstoffe wie Stickstoffoxide, Schwefeldioxid und Ammoniak mit Emissionen von insgesamt mehr als 2 Millionen Tonnen pro Jahr (Tabelle 1.1) in Feinstaub umgewandelt. Wesentliche Anteile sind auf den Verkehr (etwa 40 % des NO_x) und auf die Landwirtschaft (mehr als 90 % des NH_3) zurückzuführen.

Konzentration, Zusammensetzung und Größenverteilung von Feinstaubpartikeln werden durch lokale und regionale Schadstoffquellen beeinflusst, aber auch durch die geo-

grafische Lage, das Wetter und andere Faktoren. Die Partikelmixtur kann daher stark variieren. Insgesamt ähneln die Eigenschaften und Quellen des Feinstaubes in Deutschland jenen in vielen anderen Ländern Mitteleuropas.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Belastung mit verkehrsbedingten Emissionen von Stickstoffoxiden in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten deutlich reduziert wurde. Wie in Kapitel 6 dargestellt, lassen sich die Emissionen weiter senken, zum Beispiel durch den Einsatz neuester Fahrzeugmodelle, Aktualisierung der Software von älteren Dieselmotoren sowie durch Nachrüstung von älteren Bussen im kommunalen Verkehr mit Abgasnachbehandlungssystemen. Rückläufige Trends sind auch in den Feinstaub-Größenklassen $PM_{2,5}$ und PM_{10} zu beobachten. Weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf besteht, vor allem mit Blick auf eine weitere Minderung der Feinstaubbelastung und die Wechselwirkungen verschiedener Schadstoffe untereinander.

Literatur

- Beekmann M, Prévôt ASH, Drewnick J, et al. (2015) In situ, satellite measurement and model evidence on the dominant regional contribution to fine particulate matter levels in the Paris megacity. *Atmos. Chem. Phys.* 15: 9577-9591.
- Belisa CA, Karagulian F, Larsen BR, Hopke PK (2013) Critical review and meta-analysis of ambient particulate matter source apportionment using receptor models in Europe. *Atmospheric Environ.* 69: 94-108.
- O'Driscoll R, Stettler MEJ, Molden N, et al. (2018) Real world CO₂ and No_x emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars. *Sci. Total Environ.* 621: 282-290.
- Environmental Protection Agency (2016) Federal Register Vol. 81 No. 164. Part II. Fine Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards: State Implementation Plan Requirements, Final Rule.
- European Environment Agency (2018) Air Quality in Europe – 2018. Report.
- Glarborg PJ, Miller A, Ruscic B, Klippenstein SJ (2018) Modeling Nitrogen Chemistry in Combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.* 67: 31-68.
- Hooftman N, Messagie M, Van Mierlo J, Coosemans T (2018) A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 86: 1-21.
- Jimenez JL, Canagaratna MR, Donahue NM, et al. (2009) Evolution of organic aerosols in the atmosphere. *Science* 326: 1525-1529.
- Kulkarni P, Baron PA, Willeke KE (2011) *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Pandis SN, Skyllakou K, Florou K, et al. (2016) Urban particulate matter pollution: a tale of five cities. *Faraday Discuss.* 189: 277-290.
- Putaud J-P, van Dingenen R, Alastuey A, et al. (2010) A European aerosol phenomenology - 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmospheric Environ.* 44: 1308-1320.
- Seinfeld JH, Pandis SN (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Umweltbundesamt (2019) German Informative Inventory Report, IIR 2019. <https://iir-de.wikidot.com/welcome:welcome> [Stand: 05.04.2019]
- Umweltbundesamt (2019) Luftqualität 2018. Vorläufige Auswertung. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2018> [Stand: 05.04.2019]
- van Donkelaar A, Martin RV, Brauer M, et al. (2016) Global Estimates of Fine Particulate Matter using a Combined Geophysical-Statistical Method with Information from Satellites, Models, and Monitors. *Environ. Sci. Technol.* 50: 3762-3772.

2. Messungen und Messtechnik

Sie stehen in ländlichen Gegenden, in Ballungsgebieten und an besonders verkehrsreichen Straßen großer Städte: containergroße Messeinrichtungen zur Kontrolle der Luftqualität (Abbildung 2.1). Deutschlandweit gibt es mehr als 650 solcher Stationen. Für die meisten von ihnen sind die jeweiligen Bundesländer verantwortlich, denen die Messergebnisse einen Überblick über lokale und regionale Luftverunreinigungen liefern. Ergänzt wird das **deutsche Luftmessnetz** durch sieben, im ganzen Land verteilte Anlagen des Umweltbundesamts (UBA), die auch von Weitem herantransportierte, grenzüberschreitende Luftschadstoffe erfassen. Die Ergebnisse aller Messstationen laufen bei den Betreibern der Stationen zusammen, werden dort ausgewertet und vom UBA bundesweit zusammengeführt. Die Daten werden sowohl von den Betreibern (meist Landesumweltbehörden) als auch vom UBA aufbereitet und publiziert.



Abbildung 2.1: Messeinrichtung zur Kontrolle der Luftqualität – hier am Stuttgarter Neckartor (Foto: A. Dittler).

Öffentliche Aufmerksamkeit erhalten Luftgütemessungen vor allem dann, wenn Grenzwerte überschritten werden. Dazu kommt es gegenwärtig in Deutschland nur noch bei 4 von insgesamt 18 **Grenz- und Zielwerten für Luftschadstoffe** (siehe Kapitel 4), und zwar:

- ▶ bei den zulässigen Überschreitungstagen für den Tagesmittelwert für Feinstaub der Kategorie PM_{10}
- ▶ beim Jahresmittelwert für Stickstoffdioxid (NO_2), vor allem an verkehrsnahen Messstellen

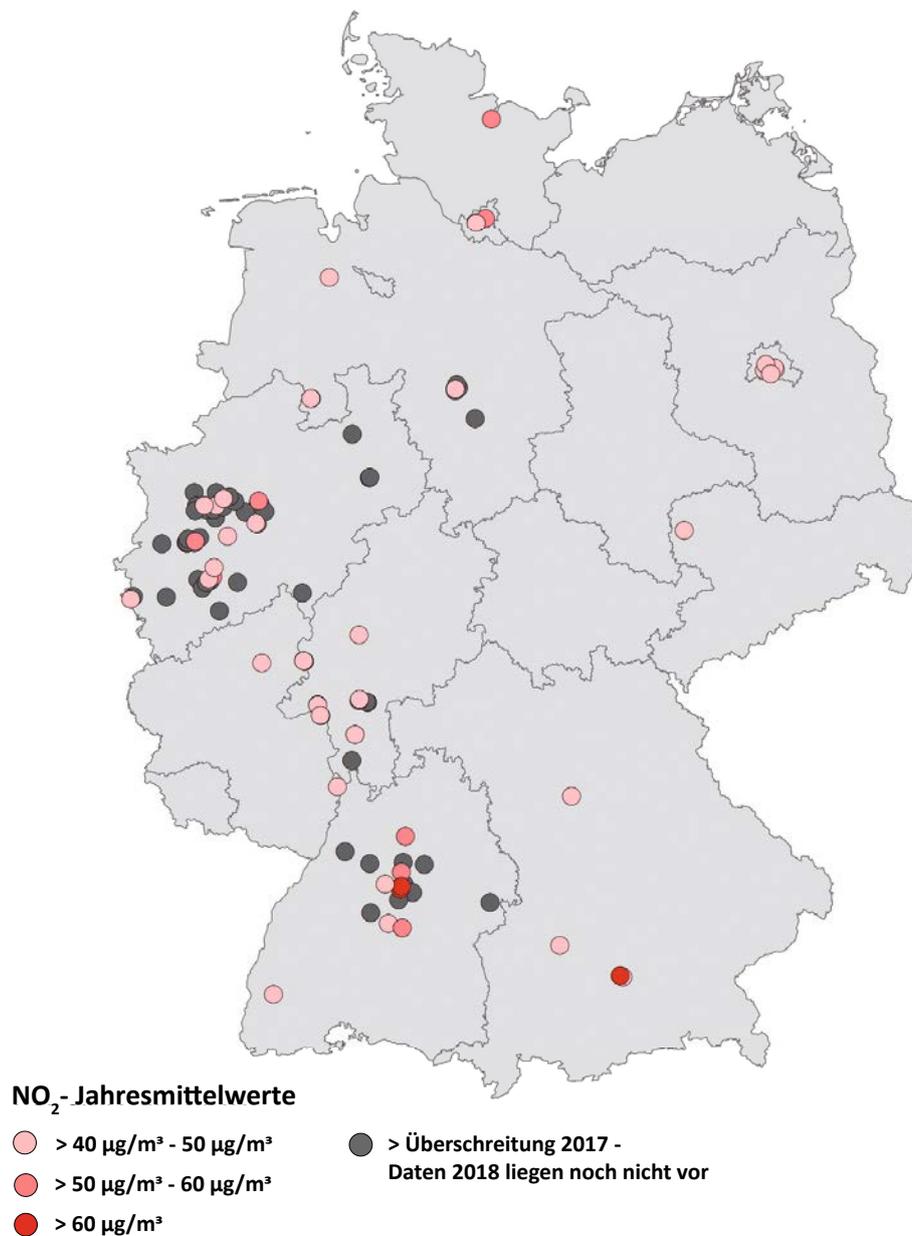


Abbildung 2.2: Die Deutschlandkarte zeigt die 47 von insgesamt mehr als 500 Messstationen, an denen im Jahr 2018 der zulässige Jahresmittelwert für die Stickstoffdioxid-Konzentration von 40 µg/m³ Luft überschritten wurde. Die dunklen Punkte markieren Messstationen, an denen dieser Grenzwert im Jahr 2017 überschritten wurde und für die Messwerte für 2018 noch nicht vorliegen (Quelle: Umweltbundesamt, unveröffentlicht).

- ▶ bei Ozon; hier wird die Anzahl der Tage mit einem Acht-Stunden-Mittelwert über 120 Millionstel Gramm pro Kubikmeter Luft (µg/m³) überschritten
- ▶ beim Zielwert für Ozon zum Schutz der Vegetation

Bei **Feinstaub** geht es um den Tagesmittelwert von 50 µg/m³ für die Kategorie PM₁₀. Laut Gesetz darf dieser Grenzwert an 35 Tagen im Jahr überschritten werden. Mit 36 Tagen wurde er im Jahr 2018 deutschlandweit nur an einer industrienahen Messstation in Nordrhein-Westfalen überschritten.

Bei **Stickstoffdioxid** lag der erfasste Jahresmittelwert im Jahr 2018 an 47 überwiegend verkehrsnahen Messpunkten über dem zulässigen Grenzwert von 40 µg/m³ (Abbildung 2.2).

Kasten 2.1: Wo Luftproben genommen werden

Umweltchemische Messungen umfassen neben der eigentlichen Messung auch die Entnahme von Proben und die Separation und Identifikation der zu analysierenden Stoffe. Die Qualitätssicherung der Messmethoden erfolgt nach vorgeschriebenen und bewährten Methoden. Weil die zu analysierenden Stoffe nicht gleichmäßig in der Umwelt verteilt sind, sind Platzierung und Zahl der Probenahme-Stationen entscheidend für die Qualität der Ergebnisse.

Verkehrsabhängige Luftschadstoffe bilden sich entlang von Straßen, die man sich als zeitlich veränderliche Linienquelle mit örtlichen Schwankungen, etwa an Kreuzungen oder Stautellen, vorstellen kann. Wenn der Verkehr fließt, findet im Bereich der Straße eine Verwirbelung der Schadstoffe statt. Die Schadstoffe breiten sich je nach Bebauung, Vegetation, Geländeform und anderen Vor-Ort-Verhältnissen sowie abhängig von Wind und Wetter aus. Sie reichern sich nicht dauerhaft in der Atmosphäre an, sondern werden über eine Vielzahl von Mechanismen chemisch oder physikalisch ein- und wieder abgebaut. Diese Vorgänge sind zeitlich veränderlich; sie erfolgen eher großflächig und nur in geringem Ausmaß entlang der Straßen.

Eine korrekte Bewertung der Messergebnisse zum Zweck des Gesundheits- und Umweltschutzes setzt folglich die Probenahme in der Nähe der Quellen, in Wohngebieten und in quellenfreiem Hintergrund, etwa in Parks, voraus – also dort, wo Menschen sich tatsächlich aufhalten. In Deutschland entspricht die Aufstellung der staatlichen Probenahme-Stationen diesen Anforderungen.

Luftschadstoffmessungen dienen der Gesundheitsvorsorge und können weitreichende Konsequenzen haben. Umso mehr kommt es auf zuverlässige **Messverfahren**, transparente und vergleichbare Messbedingungen und eine solide Qualitätssicherung an. Wo Deutschland in diesem Bereich steht, lässt sich an den Beispielen Stickstoffdioxid und Feinstaub verdeutlichen.

Grundlegende Regeln für die Messung dieser und anderer Schadstoffe enthält die 2008 erlassene EU-Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft in Europa; sie wurde im Jahr 2015 durch die Richtlinie EU 2015/1480 leicht geändert. Die 39. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (39. BImSchV) setzte die Richtlinie 2010 in deutsches Recht um. Weitere Regelungen finden sich in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) sowie in deutschen und europäischen Normen.

Stickstoffdioxid und Feinstaub werden in der Regel an den gleichen Messstationen erfasst. Für beide Stoffe gelten auch die gleichen Regeln für die Probenahme, die festlegen, wie und wo Luftproben gesammelt werden (s. Kasten 2.1). Für die Qualitätssicherung sind in beiden Fällen die Bundesländer und das Umweltbundesamt zuständig. Den Bundesländern obliegt auch die Qualitätskontrolle vor Ort; sie müssen zudem dafür sorgen, dass die Messgeräte auf ihre Eignung überprüft werden. Das UBA koordiniert diese Qualitätssicherungsmaßnahmen und fungiert, neben einem Landesamt in Nordrhein-Westfalen, als nationales Referenzlaboratorium.

Zur Konzentrationsbestimmung von **Stickstoffdioxid** wird meist die bewährte Chemilumineszenz-Methode herangezogen. Die EU-Richtlinie schreibt sie als Referenzmethode vor; konkrete Anwendungsregeln enthält die europäische Norm DIN EN 14211:2012 „Außenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz“. Dieses Verfahren nutzt den Umstand, dass bei bestimmten chemischen Reaktionen, etwa von Ozon mit Stickstoffmonoxid, Licht im roten und infraroten Bereich freigesetzt wird.

Die europäische Norm enthält zudem detaillierte Vorschriften zur Kalibrierung der Messgeräte mit Kalibriergasen und legt die Wartungsintervalle zwischen drei Monaten und drei Jahren fest. Messfehler können etwa durch die chemische Reaktion von Stick-

Kasten 2.2: Feinstaub im Größenvergleich

Für die Messung der Feinstaub-Anteile PM_{10} und $PM_{2,5}$ gelten die in der 39. BImSchV wie auch in der Norm DIN EN 12341 festgelegten Definitionen. Darin werden $PM_{2,5}$ und PM_{10} folgendermaßen bestimmt:

Bei der Bestimmung dieser PM_{10} -Konzentration (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) passiert das Aerosol einen gröbenselektiven Einlass, bei dem Partikel eines aerodynamischen Durchmessers von $10\ \mu\text{m}$ zu 50 % aus dem Aerosol abgetrennt werden. Auf dem nachfolgend angeordneten Filter werden kleinere Partikel mit höherem Anteil abgeschieden und größere Partikel mit einem geringeren Anteil (siehe Abbildung 2.3).

Analog werden bei der Bestimmung der $PM_{2,5}$ -Konzentration (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $2,5\ \mu\text{m}$ zu 50 % in die Messung einbezogen. Kleinere Partikel werden mit einem höheren und größere mit einem geringeren Anteil berücksichtigt, der bei höheren Werten gegen Null geht.

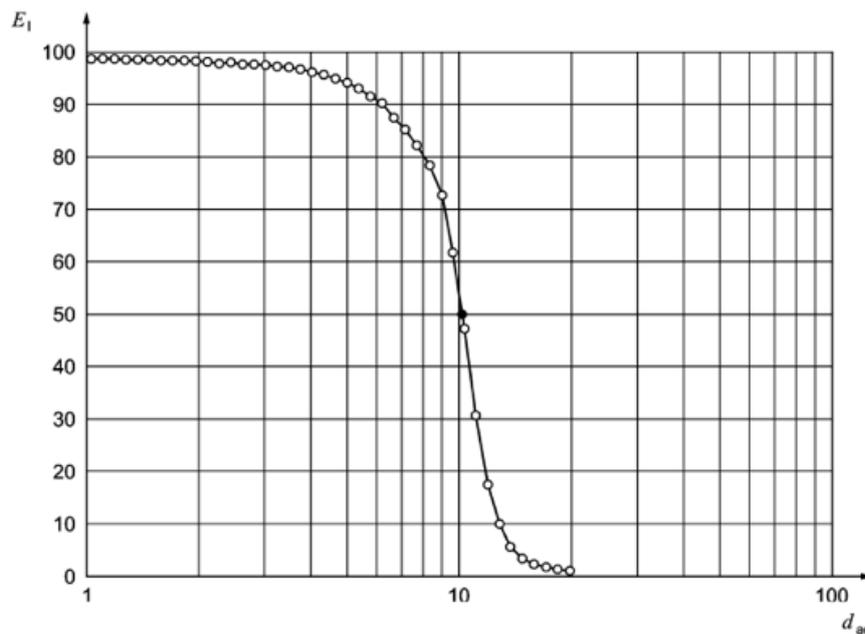


Abbildung 2.3: Bestimmung der PM_{10} -Konzentration mit einem Messgerät. Gezeigt ist der Wirkungsgrad E_1 (das heißt, zu wie viel Prozent die Partikel erfasst werden) in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser d der Partikel (in μm). (Quelle: DIN EN 12341)

stoffdioxid mit abgeschiedenen Stoffen auf dem Partikelfilter des Messgeräts auftreten. Der Einfluss solcher Fehler wird durch mehrere Qualitätssicherungsmaßnahmen minimiert. Die Fehler der eigentlichen Messmethode dürfen laut EU-Richtlinie zu einer maximalen Messunsicherheit von 15 % führen.

Feinstaub der Kategorien PM_{10} und $PM_{2,5}$ wird, so schreibt es die EU-Richtlinie vor, mit einem gravimetrischen Verfahren gemessen (siehe Kasten 2.2; siehe auch Kapitel 1). Bei dem Verfahren werden die Staubpartikel entsprechend ihrer Größe („größen-selektiv“) auf einem Filter abgeschieden und regelmäßig unter exakt definierten Laborbedingungen gewogen. Die Messunsicherheit der Methode darf bis 25 % betragen und ist damit deutlich größer als bei Stickstoffoxiden.

Mit aufwändigen Methoden, die noch nicht praxistauglich sind, lässt sich der sogenannte **Ultrafeinstaub** (abgekürzt: UFP oder $PM_{0,1}$) bestimmen. Die Partikel dieses Feinstaubes sind kleiner als $0,1\ \mu\text{m}$; sein Anteil an der Feinstaub-Gesamtmasse liegt unter 5 %. Aufgrund seiner geringen Partikelgröße und der hohen Partikelanzahl kann er jedoch mehr als 90 % aller Partikel im Feinstaub ausmachen. Für Ultrafeinstaub gibt es derzeit weder einen Richt- noch einen Grenzwert. Die Erfassung ist schwierig – Pionierarbeit leistet hier das vom Umweltbundesamt koordinierte deut-

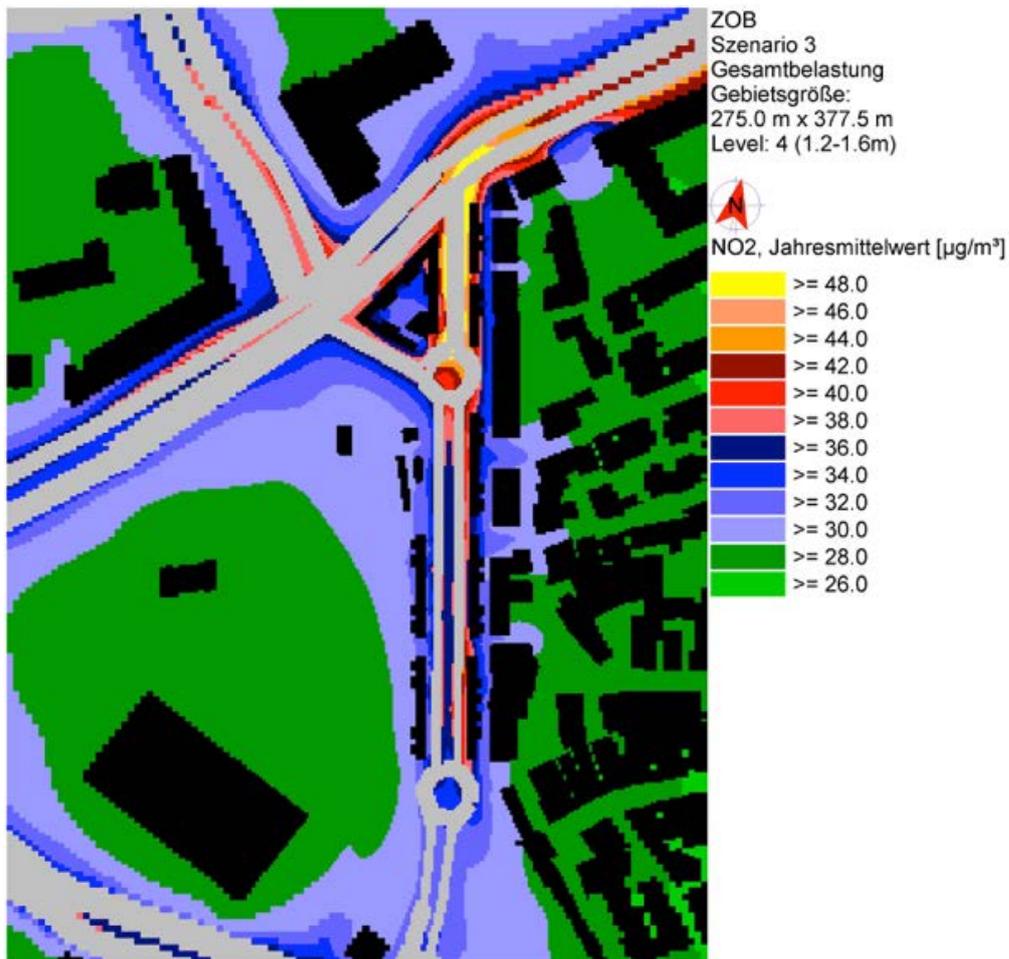


Abbildung 2.4: Stickstoffdioxid-Konzentrationen in einem verkehrsnahen Bereich in Reutlingen (Stand 2017; Gebietsgröße 275 m x 377,5 m). In dieser Modellierung, die auf Basis einer messwertgestützten Berechnung erfolgte, ist die kleinräumige Verteilung des Stickstoffdioxids erkennbar. Die höchsten Werte (oberhalb des Grenzwerts für die mittlere Jahresbelastung von 40 µg/m³; gelb/rot) finden sich direkt am Straßenrand und in der Fahrbahnmitte. (Quelle: Aviso 2017).

sche UFP-Netzwerk. Entsprechende Methoden zur Messung und Qualitätssicherung sind noch in der Entwicklung.

Erheblichen Einfluss auf die Messung von Feinstaub und Stickstoffdioxid hat die **Aufstellung der Messstation**. Vorschriften zu den Aufstellungsbedingungen finden sich in den Anlagen zum Bundesimmissionsschutzgesetz (39. BImSchV). Die Regelungen sind nicht immer eindeutig, denn um örtliche Gegebenheiten berücksichtigen zu können, gewähren sie eine gewisse Flexibilität und damit Ermessensspielräume. So dürfen sich im Umfeld des Lufteinlasses am Messgerät keine Hindernisse befinden: Der

Tabelle 2.1.: Ausgewählte Parameter für die Platzierung von verkehrsbezogenen Messstationen im Vergleich Deutschland/USA.

	Abstand der Station von der Straße		Höhe Messeinlass		Quelle
	Empfehlung	max.	min.	max.	
Deutschland	-	10 m	1,5 m	4 m	39. BImSchV
USA	innerhalb 20 m	50 m	2 m	7 m	EPA Technical Document

Messeinlass, also die Vorrichtung zur Luftaufnahme, soll „einige Meter“ von Gebäuden, Bäumen, etc. entfernt sein und in einer Höhe „von 1,5 Metern bis 4 Metern“ über dem Boden liegen – wenn die Messung ein großes Gebiet abdecken muss, auch höher.

Auf das Beispiel Straßenverkehr bezogen, liegt es auf der Hand, dass Schadstoffkonzentrationen sich je nach Abstand von den Fahrzeugabgasen und der Luftzirkulation vor Ort unterscheiden. Die Abbildung 2.4 zeigt, dass die Messwerte an einer Hauptverkehrsstraße über kleine Entfernungen variieren können, sodass der Ort der Probenahme darüber entscheiden kann, ob die Messergebnisse eine Grenzwertüberschreitung anzeigen oder aber unter dem Grenzwert liegen. Diese Unsicherheiten liegen in der Natur der Sache und können allenfalls optimiert werden, wie jüngst in einem Gutachten der EU-Kommission angeregt wurde.

Außerhalb der EU sind die Aufstellungsbedingungen für Messstationen wenig vergleichbar. Einige Staaten orientieren sich an den EU-Regeln, andere erlauben zum Beispiel deutlich größere Abstände der Messeinrichtung von der Straße. Während in der EU eine Entfernung von maximal 10 Metern erlaubt ist, sind in den USA bis zu 50 Meter Abstand rechtens; empfohlen wird dort für eine verkehrsnahen Station ein Abstand von 10 bis 20 Meter von der Straße. Ein weiterer Unterschied: In den USA liegt die maximal zulässige Messhöhe bei 7 Metern, hierzulande sind es nur 4 Meter. Entsprechend vorsichtig muss man beim Vergleich von Messergebnissen sein. Für Feinstaub wirken sich die unterschiedlichen Messbedingungen weniger aus als für Stickstoffdioxid.

Wenn also auf internationaler Ebene ein Vergleich der Messwerte angestrebt wird, wäre auch eine Harmonisierung der Messvorschriften und Aufstellungsbedingungen für Messstationen wünschenswert.

Literatur

- Aviso (2017) Fachgutachten „Modellstadt Reutlingen“. Ergänzung MISKAM-Berechnungen für drei Gebiete <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpt/Abt5/Ref541/Luftreinhalteplaene/Luftreinhalteplan/lrp-rt-4-fortschr-miskam-detailberech-3-gebiete.pdf> [Stand: 08.04.2019]
- Birmili W, Süring K, Becker K, et al. (2018) Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand. UMID: Umwelt und Mensch Informationsdienst 02/2018, 57-65.
- DIN EN 12341:2014-08 (2014) Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM_{10} - oder $PM_{2,5}$ -Massenkonzentration des Schwebstaubes, Deutsche Fassung EN 12341:2014.
- DIN EN 14211:2012-11 (2012) Außenluft – Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz, Deutsche Fassung EN 14211:2012.
- Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV).
- Otto M (2011) Analytische Chemie. Wiley-VCH, Weinheim.
- Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft in Europa.
- Richtlinie (EU) 2017/1480 der Kommission vom 28. August 2015 zur Änderung bestimmter Anhänge der Richtlinien 2004/107/EG und 2008/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates betreffend Referenzmethoden, Datenvalidierung und Standorte für Probenahmestellen zur Bestimmung der Luftqualität.

3. Gesundheitseffekte

Einleitung: Wie werden wissenschaftliche Erkenntnisse zu den Wirkungen von Luftschadstoffen gewonnen?

Erkenntnisse zu den Wirkungen von Luftschadstoffen basieren auf

- (1) Experimenten mit klar definierten Schadstoffkonzentrationen an Zellen, Zellkulturen und Tieren,
- (2) kontrollierten Experimenten mit Menschen (sogenannte Kammerexperimente) und
- (3) epidemiologischen Beobachtungsstudien in der Bevölkerung mit Messung oder Schätzung der realen Schadstoffbelastung.

Insgesamt sind aktuell mehr als 71.000 Arbeiten in der medizinischen Fachliteratur verfügbar, womit Luftschadstoffe die am besten untersuchte Umweltbelastung sind.

Experimentelle Studien an Zellen und Tieren dienen vor allem dazu, die Wirkungsmechanismen zu verstehen. Bei solchen experimentellen Untersuchungen können ganz gezielt einzelne Schadstoffe mit reiner Luft verglichen werden, sodass eine Vermischung von zum Beispiel Stickstoffdioxid-Effekten mit den Effekten anderer Schadstoffe ausgeschlossen werden kann. Aus solchen Studien lässt sich daher auch ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Exposition und dem Effekt ableiten. Anhand von Tierexperimenten wurde beispielsweise gezeigt, dass eine mehrwöchige Belastung mit hohen Konzentrationen von Stickstoffdioxid eine anhaltende Entzündungsreaktion, eine allergische Reaktionsweise und eine Überempfindlichkeit der Atemwege verursachen kann. Bei Tierexperimenten liegen die verwendeten Dosen der Schadstoffe meist erheblich über den in der Umwelt üblichen Konzentrationen. Außerdem ist die Übertragbarkeit von Zell- und Tierversuchen auf den Menschen nur mit Einschränkungen möglich.

Am Menschen (Gesunde oder Patienten) werden deshalb kontrollierte Expositionsstudien durchgeführt. Diese Untersuchungen eignen sich, um akute, vorübergehende Wirkungen von einzelnen Schadstoffen im Vergleich zu sauberer Luft zu untersuchen. Anhand solcher Kammerexperimente konnte etwa gezeigt werden, dass Versuchsteilnehmer mit einem leichten, gut eingestellten Asthma nach einer kurzen, relativ hohen Stickstoffdioxid-Belastung mit einer verstärkten Empfindlichkeit der Atemwege reagierten. Bei Kammerexperimenten handelt es sich immer um eine künstlich erzeugte Belastungssituation, der kleine, stark ausgewählte Gruppen mit freiwilligen Teilnehmern ausgesetzt werden. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die allgemeine Bevölkerung und auf besonders empfindliche Menschen ist nur mit großen Einschränkungen möglich. Außerdem können in Kammerexperimenten aus ethischen und praktischen Gründen immer nur kurzfristige und vorübergehende Wirkungen untersucht werden.

Aus diesen Gründen sind epidemiologische Beobachtungsstudien in der Bevölkerung unter realen Umgebungsbedingungen notwendig. Beobachtungsstudien können lang anhaltende Belastungssituationen – etwa die langfristige Belastung an der Wohnung in einer mehrjährigen Kohortenstudie – oder kurzfristige Effekte von täglichen Schwan-

kungen der Luftschadstoffbelastung untersuchen. Ein Beispiel dafür ist etwa der Zusammenhang zwischen täglicher Luftschadstoffkonzentration und täglicher Mortalität in einer Zeitreihenstudie oder mit medizinischen Untersuchungen an mehrmals untersuchten Patienten. Ein großer Vorteil epidemiologischer Beobachtungsstudien ist, dass auch die Auswirkungen auf besonders empfindliche Teile der Bevölkerung untersucht werden können, also auf Ungeborene, Säuglinge, Kinder, alte Menschen und Kranke. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Untersuchungen unter realen Bedingungen stattfinden.

Bei der Untersuchung von gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen in epidemiologischen Beobachtungsstudien besteht die Situation, dass die Luftschadstoffe zum Teil aus den gleichen Quellen stammen. Daher können die Expositionsmuster für verschiedene Luftschadstoffe ähnlich sein. Dies lässt sich etwa daran erkennen, dass die Belastung der Studienteilnehmer mit Stickstoffdioxid mit der Belastung gegenüber ultrafeinen Stäuben und Ruß korreliert. Dies führt dazu, dass eine Trennung des eigenständigen Effekts von Stickstoffdioxid von den Effekten anderer Schadstoffe schwierig sein kann. Bei der Interpretation der gesundheitlichen Wirkungen aus solchen Studien muss dann beachtet werden, dass damit nicht eindeutig nur die Wirkung von Stickstoffdioxid angezeigt wird. Vielmehr wird auch die Wirkung anderer Schadstoffe in dem Maße, wie sie mit Stickstoffdioxid korrelieren, miterfasst.

In epidemiologischen Studien ist es wichtig, weitere Einflussgrößen zu kontrollieren, die mit der Schadstoffbelastung und der zu untersuchenden Erkrankung zusammenhängen. Dazu zählen etwa Sozialstatus und Lebensstil der Studienteilnehmer – ob sie also rauchen, sich körperlich bewegen und wie sie sich ernähren –, da es sonst zu einer Vermischung von Effekten (Confounding) kommen kann. In qualitativ guten Studien wird dies detailliert durchgeführt und es werden persönliche Eigenschaften häufig sogar mehrmals während der Beobachtungsphase abgefragt.

Je nach Bedingungen, Fragestellung und Variabilität der Messungen können einzelne Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Daher lässt sich erst aus der Gesamtschau vieler Studien eine Beurteilung abgeben. Derartige umfassende Analysen werden sowohl von wissenschaftlichen Einrichtungen als auch von Institutionen wie der Weltgesundheitsorganisation (WHO), den Umweltbehörden einzelner Länder (etwa der Environmental Protection Agency der USA, US-EPA) oder der deutschen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (MAK-Kommission) vorgenommen. Zur Beurteilung der Kausalität werden dabei immer toxikologische Studien, Kammerexperimente und epidemiologische Studien im Zusammenhang betrachtet.

3.1 Toxikologische Bewertung

Stickstoffdioxid

Das Reizgas Stickstoffdioxid (NO_2) gelangt über die Nase in die oberen und tiefen Atemwege. Beim Kontakt mit den Schleimhäuten wandelt es sich in ein Gemisch aus Stickstoffmonoxid, salpetriger Säure und Salpetersäure um, das die Bronchien reizt und einen Asthmaanfall hervorrufen kann. In den tiefen Atemwegen kann es zu Gewebeschädigungen und Entzündungen kommen.

Im Tierversuch sind hierfür hohe Konzentrationen von Stickstoffdioxid nötig: Biochemische Veränderungen waren ab circa 1.500 Millionstel Gramm pro Kubikmeter

Luft ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nachweisbar und Gewebeschädigungen bei mehreren tausend $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese Werte liegen mehr als 30-fach beziehungsweise mehr als 200-fach über dem Grenzwert für das Jahresmittel in der Außen- wie in der Innenluft (siehe Kapitel 4). Die beobachteten Veränderungen stellen Entzündungsreize dar oder sind Folge der Entzündung. Die chronische Entzündung im Atemtrakt kann lokale (Asthma, Lungenüberblähung [=Emphysem]) und systemische Folgewirkungen haben (Herz-Kreislauf-Erkrankungen).

Ab welcher Stickstoffdioxid-Konzentration **akute Symptome** beim Menschen auftreten, lässt sich aus den wenigen bisher durchgeführten Laborversuchen mit gesunden Versuchsteilnehmern nicht sicher ableiten. In einem Experiment zur akuten Belastung atmeten freiwillige Testpersonen kurzzeitig Stickstoffdioxid in einer Konzentration von 2850 Millionstel Gramm pro Kubikmeter Luft ein. Diese hohe Dosis rief keine oder nur geringfügige gesundheitliche Symptome bei den Versuchspersonen hervor.

Asthmatiker hingegen reagieren oft schon bei sehr viel geringeren Stickstoffdioxid-Konzentrationen mit einer Verengung der Atemwege und einer gesteigerten Empfindlichkeit gegenüber allergieauslösenden Substanzen. In einzelnen Untersuchungen steigerte Stickstoffdioxid bei einem Teil der Asthmapatienten schon bei Konzentrationen von $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ innerhalb einer Stunde die Empfindlichkeit der Atemwege. In anderen Untersuchungen ließen sich solche Wirkungen erst bei doppelt oder dreifach so hohen Konzentrationen nachweisen. Der Wert von $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt unterhalb des Ein-Stunden-Grenzwerts für Stickstoffdioxid von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Werte von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ werden an nicht wenigen besonders belasteten Verkehrswegen immer wieder erreicht oder überschritten.

Bei Personen, die Stickstoffdioxid über **längere Zeit** einatmen, wurden vermehrt Luftnot, chronische Bronchitis und Schäden an den Lungenbläschen beobachtet.

Im Tierversuch führt die längerfristige Einwirkung von Stickstoffdioxid in hoher Konzentration von mehr als $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu Lungenüberblähung, Veränderungen im Immunsystem und einer höheren Anfälligkeit für Infekte, wobei die Effekte nach einigen Monaten nachließen. In anderen Tierversuchen sind bei Einwirkung von Stickstoffdioxid über mehrere Wochen bis Monate Entzündungsreaktionen der Lunge, immunologische Veränderungen und eine erhöhte Anfälligkeit für allergische Reaktionen und Infekte beobachtet worden.

Feinstaub

Feinstaubteilchen bestehen aus unterschiedlichen chemischen Komponenten und unterscheiden sich in Partikelgröße, Form, chemischer Zusammensetzung und Wasserlöslichkeit. Ihre Schädlichkeit hat weniger mit ihrer chemischen Zusammensetzung zu tun als vielmehr mit ihrer Eigenschaft als Fremdpartikel, die zu anhaltenden Irritationen im Organismus führen können. Besonders belastend sind sogenannte granulare biobeständige Partikel, also körnige Staubteilchen, die vom Körper nicht abbaubar sind. Bei Überschreitung des Grenzwerts für die maximale Arbeitsplatzkonzentration gelten sie in der Arbeitsmedizin als krebserzeugend für den Menschen.

Je kleiner die Teilchen sind, desto tiefer können sie in den Körper eindringen. So gelangen PM_{10} -Partikel bis in die Bronchien, $\text{PM}_{2,5}$ -Teilchen können bis in die Lungenbläschen eingeatmet werden. Die größeren Atemwege können sich zum Teil selbst reinigen, indem sie die Partikel wieder heraustransportieren. Kleine Partikel werden

teilweise wieder ausgeatmet, sie können aber auch über lange Zeit in den tiefen Atemwegen verbleiben. Ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser von 0,1 Millionstel Meter (μm) und weniger können von der Lunge in die Blutgefäße übertreten. Vom Blutstrom weitergetragen können sie in anderen Organsystemen und im Blut selbst Schäden anrichten.

Die Wirkweise von Feinstaub wurde in einer großen Zahl von Zellversuchen, Tierexperimenten und Studien am Menschen erforscht. Zwar steht ein Gesamtbild noch aus, doch konnten wichtige Krankheitsmechanismen bereits aufgedeckt werden.

In Bronchien und Lunge lösen Partikel **Entzündungen** aus. Eine Komponente dabei ist der sogenannte oxidative Stress. Das bedeutet, dass reaktive Sauerstoffverbindungen entstehen, die wiederum Entzündungen auslösen und verstärken können. Bei Vorerkrankungen der Atemwege und bei besonders empfindlichen Menschen können sich die Bronchien nach einer akuten Belastung so verengen, dass es zu Husten und Atemnot bis hin zu Asthmaanfällen kommt. Langfristig kann die Lunge eine Neigung zu allergischen Reaktionen entwickeln und es kann zu der Entwicklung einer Asthmaerkrankung und chronischen Lungenerkrankungen bei Erwachsenen kommen. Bei Kindern verlangsamt sich das Lungenwachstum. Feinstaub selbst und angelagerte weitere Luftschadstoffe begünstigen die Entstehung von Lungenkrebs.

Entzündungen in den Bronchien und den Lungenbläschen führen zur Ausschüttung von Botenstoffen, die über die Blutbahn eine Entzündungsreaktion im gesamten Körper auslösen können. Dadurch sinkt die Elastizität der Blutgefäße, die Gerinnungsneigung des Bluts nimmt zu und die Empfindlichkeit der Körperzellen für das Hormon Insulin sinkt. Mögliche Folgen sind **Herzinfarkte** und **Schlaganfälle**, die innerhalb von Stunden nach einer erhöhten Belastung auftreten können, sowie langfristig die Entwicklung einer **Zuckerkrankheit** (Typ-2 Diabetes) und eine beschleunigte Arteriosklerose. Auch im **Gehirn** wurden entzündliche Vorgänge beobachtet und mit einer schnelleren Entwicklung einer Demenz bei älteren Menschen und einer verzögerten Intelligenzentwicklung bei Kindern in Verbindung gebracht. Neben entzündlichen Reaktionen kann Feinstaub auch auf andere Weise **Schäden im Herz-Kreislauf-System** hervorrufen. Dabei wird zunächst das vegetative Nervensystem aktiviert, wodurch Herzfrequenz und Blutdruck steigen. Dies kann zu Herzinfarkten und Herzrhythmusstörungen führen.

3.2 Epidemiologische Bewertung

Stickstoffdioxid

Was ist gesichertes Wissen zu den Wirkungen von Stickstoffdioxid?

Epidemiologische Studien zeigen, dass bereits eine **kurzzeitige Belastung** (über Stunden bis Tage) mit hohen in der Umgebungsluft vorkommenden Konzentrationen von Stickstoffdioxid bei empfindlichen Personen **akute Atemwegsbeschwerden** auslösen kann. Hierzu zählen Asthma-Anfälle und vermehrte Krankenhausaufnahmen wegen Asthma, eine Abnahme der Lungenfunktion und eine Entzündungsreaktion in der Lunge. Nicht alle Menschen reagieren gleich auf kurzzeitige Belastungen mit Stickstoffdioxid. So merken gesunde Menschen mit einem funktionierenden Abwehrsystem meist gar nichts von höheren Stickstoffdioxid-Konzentrationen. Jedoch können besonders empfindliche Menschen, zum Beispiel Kinder oder Erwachsene, die an einem Asthma leiden, mit einem akuten Asthmaanfall oder häufigen Bronchitis-Erkrankungen reagieren.

Eine **Langzeitbelastung** mit Stickstoffdioxid wird als wahrscheinlich kausal für die **Entwicklung von Asthma** angesehen. Dieser Zusammenhang ist biologisch plausibel, da sowohl wiederholte Kurzzeitbelastungen wie auch Langzeitbelastungen in experimentellen Studien an Tieren zur Entwicklung von allergischen Reaktionsweisen führen und bei diesen Studien Verzerrungen oder Wirkungen von anderen Schadstoffen ausgeschlossen werden können. Die Beobachtungsstudien, die zu der Einschätzung einer wahrscheinlich kausalen Wirkung führten, fanden unter Stickstoffdioxid-Konzentrationen in der Außenluft zwischen 15 und 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ statt. Nicht alle Menschen reagieren auf Langzeitbelastungen gleich und bei vielen Menschen werden keinerlei Auswirkungen beobachtet. Auf der anderen Seite ist aber bekannt, dass bestimmte Menschen, etwa bei Vorliegen bestimmter genetischer Merkmale, stärker reagieren. Auch Säuglinge, Kleinkinder und Schulkinder sind in aller Regel besonders empfindlich, da sich bei ihnen das Lungengewebe noch entwickelt und daher leichter geschädigt werden kann.

Welche gesundheitlichen Wirkungen von Stickstoffdioxid werden vermutet, sind aber bisher nicht gesichert?

Es bestehen Hinweise auf einen kausalen Zusammenhang zwischen einer **kurzfristigen** Stickstoffdioxid-Belastung und der **Gesamtsterblichkeit** sowie der **Sterblichkeit an Lungenerkrankungen**. Dieser Zusammenhang ist dabei weitgehend unabhängig von den gleichzeitig bestehenden Feinstaubkonzentrationen. Außerdem bestehen konsistente Zusammenhänge mit **Krankenhauseinweisungen wegen Herz-Kreislauf-Erkrankungen**, hierbei vornehmlich wegen koronarer Herzkrankheit und Herzinfarkten. Bei diesen Zusammenhängen ist nicht sicher, ob sie tatsächlich kausal sind, weil es bisher kaum toxikologische Studien gibt, welche die biologischen Wirkungspfade für eine erhöhte Sterblichkeit oder einen Einfluss auf das Herzkreislaufsystem direkt untersuchen.

Weitere gesundheitliche Risiken, die mit einer **chronischen Belastung** gegenüber Stickstoffdioxid in Verbindung gebracht werden, sind eine erhöhte **Sterblichkeit an Herz-Kreislauf-Erkrankungen**, die Entwicklung von **chronisch obstruktiver Lungenerkrankung**, das Auftreten von **Schlaganfällen**, **Herzinsuffizienz** und **Hypertonie**, und die Entwicklung eines **Diabetes mellitus**. Auch hier gibt es Hinweise auf eine kausale Beziehung, aber keine gesicherte Kausalität, weil es bisher nur wenige Studien zur Toxikologie von Stickstoffdioxid gibt, welche die biologischen Wirkungsweisen erklären würden.

Feinstaub

Was ist gesichert über die Wirkungen von Feinstaub?

Weltweit besteht Einigkeit darüber, dass von Feinstaub im Vergleich zu Stickstoffdioxid die höhere Gesundheitsgefahr ausgeht. Deutlich mehr epidemiologische Studien und umfangreiche toxikologische Studien erlauben eine bessere Charakterisierung der gesundheitlichen Wirkungen und eine klarere Bewertung der Kausalität als bei Stickstoffdioxid. Trotz der guten Studienlage konnte bisher keine untere Wirkungsschwelle identifiziert werden. Das heißt, dass selbst unterhalb der derzeit gültigen Grenzwerte der EU und sogar unterhalb des deutlich niedrigeren Richtwerts der Weltgesundheitsorganisation die Wirkungen mit zunehmender Belastung ansteigen.

Bei **kurzfristiger Belastung** kommt es zu einem Anstieg der täglichen **Sterberate** um 0,4 % bis 1,0 % pro Anstieg der täglichen PM_{10} -Belastung um 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Außerdem

werden mehr Menschen wegen **Asthmaanfällen, Herzinfarkten, Herzinsuffizienz oder Schlaganfällen** ins Krankenhaus eingewiesen. Im Blut kann man nach Tagen mit hoher Feinstaubkonzentration erhöhte Entzündungswerte und eine verstärkte Gerinnungsneigung messen.

Epidemiologische Studien zu **langfristigen Belastungen** mit Feinstäuben (Jahre bis Jahrzehnte) zeigen erhebliche Folgen für die menschliche Gesundheit. Bei langfristiger Einwirkung von Feinstaub-Konzentrationen, wie sie heute in Europa üblich sind, steigt die **Sterblichkeit** in Europa um rund 7 % (mit einer Streuung [Vertrauensbereich] von 2 % bis 13 %) pro zusätzlicher Langzeitbelastung von 5 µg/m³ PM_{2,5}. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von **Herzinfarkten** steigt um rund 12 % (Vertrauensbereich 1 % bis 25 %). Kinder haben ein **vermindertes Lungenwachstum**, wobei eine Verbesserung der Luftqualität zu einem Anstieg des Lungenwachstums führt. Feinstaub erhöht das Risiko, an **Lungenkrebs** zu erkranken. Inzwischen gilt es als epidemiologisch gesichert, dass Feinstaub das Risiko für eine **Zuckerkrankheit** erhöht (Typ-2 Diabetes).

Wichtig ist, dass gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub auch unterhalb des heute in der EU gültigen Grenzwerts vorkommen. Diese Wirkungen unterhalb der EU-Grenzwerte und sogar unterhalb des WHO-Richtwerts werden zurzeit in drei großen Studien mit jeweils mehreren Millionen Probanden in Europa, den USA und in Kanada untersucht. Erste Ergebnisse aus den USA zeigen eine lineare Expositions-Wirkungs-Beziehung von Feinstaub mit der Sterblichkeit bis hinunter zu einem Jahresmittelwert von 5 µg/m³. Das bedeutet: Jede Reduktion der Belastung ist mit einem Gesundheitsgewinn verbunden.

Welche gesundheitlichen Wirkungen von Feinstaub werden vermutet, sind aber noch nicht endgültig gesichert?

Eine hohe Feinstaubbelastung der Mutter während der Schwangerschaft ist mit einem **niedrigeren Geburtsgewicht** des Babys verbunden. Neuere Studien deuten darauf hin, dass vor allem verkehrsbedingte Schadstoffe zu Beeinträchtigungen der **Gehirnentwicklung** bei Kindern und zu einer schnelleren Entwicklung einer **Demenz** bei älteren Menschen führen. Für diese gesundheitlichen Folgen liegen aber noch nicht genügend Studien vor, um von einem kausalen Zusammenhang sprechen zu können.

Tabelle 3.1: Luftschadstoffe und ihre Gesundheitsauswirkungen (basierend auf veröffentlichten Bewertungen bis 2016).

Luftschadstoff	Gesundheitsauswirkungen	Bewertung	Quelle
Stickstoffdioxid	Kurzfristig: Verschlechterung von Atemwegserkrankungen	kausal	US-EPA (2016) US-EPA (2009)
	Langfristig: Entwicklung von Atemwegserkrankungen	wahrscheinlich kausal	US-EPA (2016) US-EPA (2009)
Feinstaub (PM _{2,5})	Sterblichkeit	kausal	US-EPA (2009)
	Herz-Kreislauf-Erkrankungen	kausal	US-EPA (2009)
	Lungenkrebserkrankungen	kausal	IARC 2016
	Atemwegserkrankungen	wahrscheinlich kausal	US-EPA (2016) US-EPA (2009)

Exkurs: Krankheitslastberechnung

Mit Berechnungen der sogenannten Krankheitslast ermittelt man, wie stark sich verschiedene Risikofaktoren auf die Gesundheit und die jährliche Zahl von Krankheitsfällen oder Todesfällen in der Bevölkerung auswirken. Im Vergleich zeigt sich dann, welcher Risikofaktor zu besonders vielen Erkrankungen, Todesfällen oder verlorenen Lebensjahren führt. Das hilft, die Prioritäten für die Prävention richtig zu setzen. Typische Risikofaktoren, die in Berechnungen von Krankheitslasten verglichen werden, sind zum Beispiel Rauchen, ungesunde Ernährung, Alkoholkonsum, Bewegungsmangel, Luftverschmutzung und Lärm.

Die Berechnungen folgen einer Standardmethode, wie sie zum Beispiel auch die Weltgesundheitsorganisation anwendet. Dabei werden typischerweise mehrere Maße für die gesamte Krankheitslast in einer Bevölkerung errechnet. Ein Maß sind zuschreibbare (fachsprachlich: attributable) vorzeitige Todesfälle. Weitere Maße sind verlorene Lebensjahre sowie der Verlust gesunder Lebensjahre (fachsprachlich: Disability-Adjusted Life Years, DALYs). Diese Maßzahlen beziffern jenen Anteil an der Sterblichkeit (Gesamtzahl aller Todesfälle pro Jahr) beziehungsweise am Verlust gesunder Lebenszeit, der einem bestimmten Risikofaktor zugeordnet werden kann. Sie ermöglichen einen Vergleich zwischen verschiedenen Risikofaktoren oder beschreiben die Entwicklung über mehrere Jahre hinweg.

Mit dieser Standardmethode berechnet das US-amerikanische Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) im Rahmen des Projekts Global Burden of Disease (GBD) regelmäßig die Krankheitslasten für die gesamte Welt und für einzelne Länder. Für Deutschland zeigt sich beispielsweise nach den letztverfügbaren umfangreich aufgearbeiteten Daten von 2010 (Abbildung 3.1) ein insgesamt deutlicher Rückgang der Krankheitslast gegenüber 1990. An der bestehenden Krankheitslast haben ernährungsbedingte Risikofaktoren mit fast 14 % den stärksten Einfluss, gefolgt von Bluthochdruck, Rauchen und Übergewicht. Luftverschmutzung liegt mit einem Anteil von rund 2 % an der Krankheitslast bei Frauen und rund 3 % bei Männern auf Platz 8 beziehungsweise 10 von insgesamt 84 untersuchten Risikofaktoren. In ihren Auswirkungen ist sie vergleichbar mit einem hohen Cholesterinwert bei Frauen und berufsbedingten Risiken bei Männern (jeweils knapp 4 %). Unter den zehn wichtigsten Risikofaktoren zeigte Luftverschmutzung die stärkste Abnahme im Beobachtungszeitraum (-67 %).

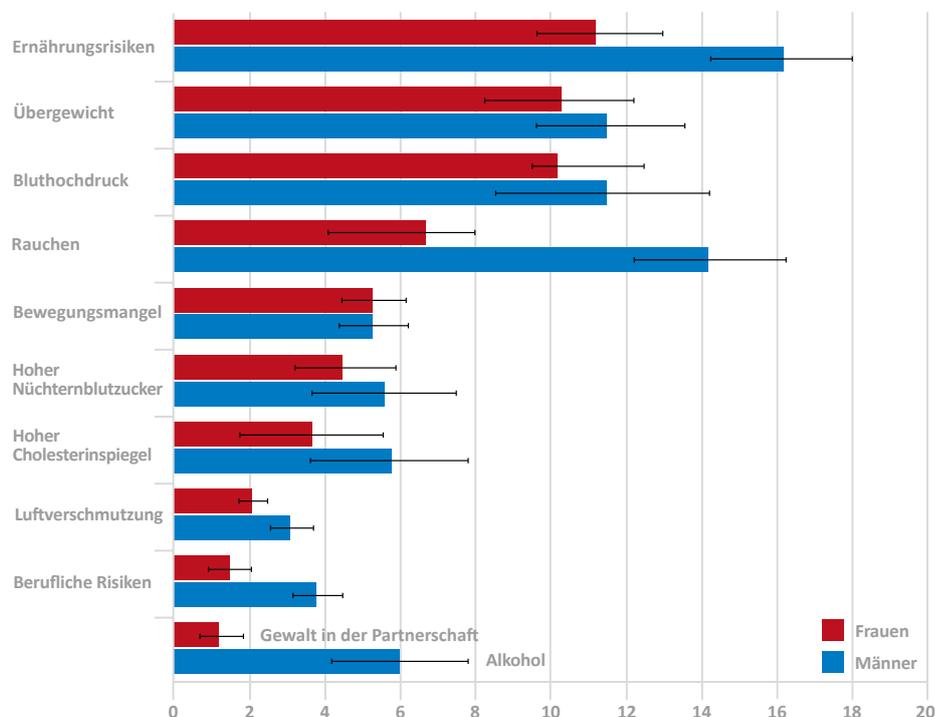


Abbildung 3.1: Krankheitslastberechnung für Deutschland. Angegeben sind die wichtigsten Risikofaktoren und die ihnen zuschreibbare Krankheitslast (angegeben als % verlorene gesunde Lebensjahre, sogenannte DALYs; die schwarzen Striche geben die Streuung der Werte an (95 % Vertrauensbereich) (Quelle: Plass et al., 2014).

Auch die Europäische Umweltagentur berechnet jährlich die Krankheitslast für die Luftschadstoffe Feinstaub und Stickstoffdioxid für Europa insgesamt und für jedes Mitgliedsland einzeln. Der größte Teil der Krankheitslast in Deutschland (2015) wird demnach von Feinstaub verursacht (etwa 60.000 zuschreibbare Todesfälle und 640.000 verlorene Lebensjahre). Rund 13.000 Todesfälle und 130.000 verlorene Lebensjahre werden Stickstoffdioxid zugeschrieben, wobei die Unsicherheiten im Bereich von ± 35 -45 % liegen (95 %-Vertrauensbereich). Aktuelle Studien deutscher Forschungseinrichtungen finden für Stickstoffdioxid ähnliche Ergebnisse und für Feinstaub deutlich höhere Auswirkungen auf Grundlage neuester epidemiologischer Daten. So zeigt eine viel diskutierte Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, dass allein die städtische und ländliche Hintergrundbelastung mit Stickstoffdioxid einhergeht mit etwa 6.000 (Vertrauensbereich 2.000 bis 10.000) zuschreibbaren Todesfällen und etwa 50.000 (Vertrauensbereich 17.000 bis 82.000) verlorenen Lebensjahren pro Jahr durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, für die es Hinweise auf eine kausale Beziehung gibt. Insgesamt fand die Studie damit eine im Vergleich zu anderen Risikofaktoren relativ geringe, insgesamt abnehmende, aber weiterhin messbare Erhöhung der kardiovaskulären Krankheitslast durch Stickstoffdioxid.

Bei der Berechnung der Krankheitslast gibt es eine Reihe von Unsicherheiten. Die Krankheitslastberechnungen schätzen den Einfluss unterschiedlicher Risikofaktoren auf die Krankheitslast in der gesamten Bevölkerung. Bestimmte einzelne Todesfälle können hierdurch nicht identifiziert werden.

Die zuschreibbaren Todesfälle stellen eine konservative Schätzung der durch einen bestimmten Risikofaktor mitverursachten Todesfälle dar. Sie sind anfällig für Fehlinterpretationen, zumal die tatsächliche Anzahl an Todesfällen, an denen der Risikofaktor mit beteiligt ist, hierdurch unterschätzt wird.

Daher bevorzugen manche Wissenschaftler die Anzahl verlorener Lebensjahre als Vergleichsmaß. Andere wiederum plädieren für ein Maß, das neben den zuschreibbaren Todesfällen auch die Belastung durch nicht-tödliche Erkrankungen mit einbezieht.

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Maßzahlen sind Gegenstand kontroverser Diskussionen. Wissenschaftlicher Konsens in der Epidemiologie ist, dass die Krankheitslastberechnung eine vielfach bewährte Methode ist, um unterschiedliche Risikofaktoren in ihrer Auswirkung auf die Bevölkerung zu vergleichen.

Literatur

- Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, et al. (2014) Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet*. 383: 785-795.
- Beratungskommission der Gesellschaft für Toxikologie (2019) Der aktuelle NO₂-Grenzwert ist wissenschaftlich plausibel. https://www.toxikologie.de/fileadmin/user_upload/GT/Aktuelles/2019-02-26_Beratungskommission_GT_NO2.pdf [Stand: 05.04.2019]
- Brand P, Bertram J, Chaker A, et al. (2016) Biological effects of inhaled nitrogen dioxide in healthy human subjects. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 89: 1017-1024.
- Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA 3rd, et al. (2010) Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 121: 2331-2378.
- Brown JS (2015) Nitrogen dioxide exposure and airway responsiveness in individuals with asthma. *Inhal. Toxicol.* 27: 1-14.
- Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, et al. (2018) Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115: 9592-9597.
- Cesaroni G, Forastiere F, Stafoggia M, et al. (2014) Long term exposure to ambient air pollution and incidence of acute coronary events: prospective cohort study and meta-analysis in 11 European cohorts from the ESCAPE Project. *Brit. Med. J.* 348: f7412.
- Clifford A, Lang L, Chen R, et al. (2016) Exposure to air pollution and cognitive functioning across the life course – A systematic literature review. *Environ. Res.* 147: 383-398.
- COMEAP (2018) Associations of long-term average concentrations of nitrogen dioxide with mortality. A report by the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/734799/COMEAP_NO2_Report.pdf [Stand: 05.04.2019]
- Deutsche Forschungsgemeinschaft, MAK-Kommission, Stickstoffdioxid (2010) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/3527600418.mb1010244d0049> [Stand: 05.04.2019]
- Di Q, Wang Y, Zanobetti A, et al. (2017) Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *N. Engl. J. Med.* 376: 2513-2522.
- Eze IC, Hemkens LG, Bucher HC, et al. (2015) Association between Ambient Air Pollution and Diabetes Mellitus in Europe and North America: Systematic Review and Meta-Analysis. *Environ. Health Perspect.* 123: 381-389.
- Franklin BA, Brook R, Pope CA 3rd (2015) Air pollution and cardiovascular disease. *Curr. Probl. Cardiol.* 40: 207-38.
- Gauderman WJ, Urman R, Avol E, et al. (2015) Association of improved air quality with lung development in children. *N. Engl. J. Med.* 372: 905-913.
- Goodman JE, Chandalia JK, Thakali S, Seeley M (2009) Meta-analysis of nitrogen dioxide exposure and airway hyper-responsiveness in asthmatics. *Crit. Rev. Toxicol.* 39: 719-742.
- IARC (2016) Outdoor air pollution. In: IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 109. International Agency for Research on Cancer, Lyon. <http://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Outdoor-Air-Pollution-2015> [Stand: 05.04.2019]
- Künzli N, Perez L, von Klot S, et al. (2011) Investigating air pollution and atherosclerosis in humans: concepts and outlook. *Prog. Cardiovasc. Dis.* 53: 334-343.
- Lelieveld J, Klingmüller K, Pozzer A, et al. (2019) Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *Eur. Heart J.*: ehz135.
- Mills IC, Atkinson RW, Anderson HR, et al. (2016) Distinguishing the associations between daily mortality and hospital admissions and nitrogen dioxide from those of PM. *Brit. Med. J. Open*: e010751.
- Pedersen M, Giorgis-Allemand L, Bernard C, et al. (2013) Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study (ESCAPE). *Lancet Respir. Med.* 1: 695-704.
- Plass D, Vos T, Hornberg C, et al. (2014) Entwicklung der Krankheitslast in Deutschland. Ergebnisse, Potenziale und Grenzen der Global Burden of Disease-Studien. *Dtsch. Arztebl. Int.* 111: 629-638.
- Rao X, Montresor-Lopez J, Puett R, et al. (2015) Ambient air pollution: an emerging risk factor for diabetes mellitus. *Curr. Diab. Rep.* 15: 603.
- Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen R, et al. (2013) Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *Lancet Oncol.* 14: 813-822.
- Schneider A, Cyrus J, Breitner S, et al. (2018) Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid-Exposition in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/quantifizierung-von-umweltbedingten> [Stand: 05.04.2019]
- Umweltbundesamt (2019) Richtwerte für Stickstoffdioxid (NO₂) in der Innenraumluft. Mitteilung des Ausschusses für Innenraumrichtwerte (AIR). *Bundesgesundheitsbl.* 41: 9-12.
- US-EPA (2016) Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen - Health Criteria EPA/600/R-15/068.
- US-EPA (2009) Integrated Science Assessment for Particulate Matter. Final Report. Washington, DC.

4. Grenzwerte

Gesunde Luft für alle, jeden Tag und ein Leben lang – um dieses Ziel zu erreichen, gibt es gesetzlich bindende Grenzwerte für Luftschadstoffe. Sie werden in einem politischen Prozess ausgehandelt und berücksichtigen neben wissenschaftlichen Erkenntnissen auch die technische Machbarkeit und den Aufwand, der zu betreiben ist, um die Grenzwerte zu kontrollieren und einzuhalten. Bedeutsam sind auch wirtschaftliche Aspekte wie der Erhalt von Arbeitsplätzen. Insofern sind Grenzwerte ein Kompromiss zwischen medizinisch Anzustrebendem und gesellschaftlich Möglichem.

In Deutschland gelten die von der EU festgelegten **Grenzwerte** und **Richtwerte** für Luftschadstoffe. Es gibt Grenzwerte für die Emission, also den Ausstoß von Schadstoffen, und Grenzwerte für die Immission, also die Einwirkung schädlicher Substanzen auf Mensch und Umwelt.

Den rechtlichen Rahmen für die Immission steckt die **EU-Richtlinie** 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft in Europa ab, die im Jahr 2008 vom Europäischen Parlament erlassen wurde. Darin sind Grenzwerte für Stickstoffdioxid, Feinstaub in zwei Größenklassen, Schwefeldioxid, Blei, Benzol und Kohlenstoffmonoxid festgelegt (siehe Tabelle 4.1). Die EU-Richtlinie wurde 2010 im Rahmen des Bundesimmissionschutzgesetzes eins zu eins in deutsches Recht überführt und im Jahr 2015 aktualisiert. Seither müssen Bund, Länder und Kommunen mit wenigen Ausnahmen flächendeckend für die Einhaltung der Grenzwerte sorgen und bei Überschreitungen wirksame Gegenmaßnahmen ergreifen (siehe Kapitel 5).

Anders als Grenzwerte sind **Zielwerte** nicht verpflichtend; sie dienen der langfristigen Orientierung. Ein solcher Zielwert gilt etwa für den Luftschadstoff Ozon.

Die in Europa geltenden Grenzwerte sind dem **Vorsorgeprinzip** verpflichtet. Demnach ist es Aufgabe des Gesetzgebers, die Bevölkerung auch vor nur möglicherweise gesundheitsgefährdenden Substanzen zu schützen, selbst wenn Schäden durch wissenschaftliche Methoden nicht eindeutig nachgewiesen werden können. Besonders Schutzbedürftige wie Asthmatiker, Kleinkinder und alte Menschen sind ausdrücklich in die EU-Luftqualitätsrichtlinie einbezogen. In vielen Ländern, unter anderem in den USA, lässt man sich nicht vom Vorsorgeprinzip leiten, sondern besteht auf dem eindeutigen Nachweis einer Schädigung.

Die in der Tabelle 4.1 aufgelisteten Grenz- und Zielwerte sind Immissionswerte; sie beziffern die maximal erlaubte Konzentration des jeweiligen Stoffs in der Atemluft. Der Gesetzgeber berücksichtigt darüber hinaus die Dauer der Einwirkung: Für kurzfristige Immissionen legt er Stunden- oder Tagesmittelwerte fest, für langfristige Immissionen Jahresmittelwerte. Diese sollen die gesamte Bevölkerung rund um die Uhr vor Gesundheitsschäden durch den regulierten Stoff schützen.

Tabelle 4.1: Schadstoffe und ihre Immissionsgrenzwerte gemäß 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (39. BImSchV).

Schadstoff	Immissionsgrenzwert / Richtwert		KenngroÙe	Schutz von...
Feinstaub - PM ₁₀	50 µg/m ³	max. 35 Überschreitungen pro Jahr	Tagesmittel	menschlicher Gesundheit
	40 µg/m ³		Jahresmittelwert	
Feinstaub - PM _{2,5}	25 µg/m ³		Jahresmittelwert	
NO ₂	200 µg/m ³	max. 18 Überschreitungen pro Jahr	1h-Mittel	menschlicher Gesundheit
	40 µg/m ³		Jahresmittelwert	
NO _x	30 µg/m ³		Jahresmittelwert	Vegetation
SO ₂	350 µg/m ³	max. 24 Überschreitungen pro Jahr	1h-Mittel	menschlicher Gesundheit
	125 µg/m ³	max. 3 Überschreitungen pro Jahr	Tagesmittel	
	20 µg/m ³		Jahresmittelwert	Vegetation
Blei	0,5 µg/m ³		Jahresmittelwert	menschlicher Gesundheit
Benzol	5 µg/m ³		Jahresmittelwert	
CO	10 µg/m ³		8h-Mittel	
Ozon	120 µg/m ³	max. 25 Überschreitungen pro Jahr	8h-Mittel	
	18000 µg/m ³ *h	Mai-Juli	Mittel über 5 Jahre	Vegetation
Arsen	6 ng/m ³ (ng = Nano-gramm/Milliardstel Gramm)		Jahresmittelwert	menschlicher Gesundheit & Umwelt
Cadmium	5 ng/m ³			
Nickel	20 ng/m ³			
Benzo(a)pyren	1 ng/m ³			

Für Stickstoffdioxid zum Beispiel gibt es zwei Grenzwerte: den Ein-Stunden-Wert von 200 Millionstel Gramm pro Kubikmeter Luft (µg/m³) und den Jahresmittelwert von 40 µg/m³. Der Wert von 200 µg/m³ soll vor akuten Wirkungen an den Atemwegen schützen, der Wert von 40 µg/m³ soll langfristige Gesundheitsschäden vermeiden. Dieser Grenzwert-Philosophie folgend muss jeder Einzelwert unter 200 µg/m³ liegen; der Wert von 40 µg/m³ muss hingegen als mittlere jährliche Belastung eingehalten werden.

Eine zurzeit vor dem Europäischen Gerichtshof verhandelte Frage ist, welche Werte in solchen Bereichen einzuhalten sind, in denen die höchsten Konzentrationen auftreten, also etwa an verkehrsreichen Stellen (siehe Kapitel 5). Für diese Bereiche müsste aus toxikologischer Sicht der Ein-Stunden-Wert von 200 µg/m³ eingehalten werden, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass sich dort Personen 24 Stunden täglich und das ganze Jahr lang aufhalten.

Die vorsorglichen Grenzwerte für die Umgebungsluft sind deutlich strenger als die entsprechenden **Arbeitsplatzgrenzwerte** (AGW). Für Stickstoffdioxid liegt dieser, um ein Beispiel zu nennen, bei $950 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Demgegenüber erlauben die Umgebungsluft-Grenzwerte, wie erwähnt, lediglich eine Höchstbelastung von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Ein-Stunden-Wert und von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel. In der öffentlichen Diskussion wird dies immer wieder als Widerspruch dargestellt, was jedoch falsch ist. Denn anders als Atemluft-Grenzwerte, die für das ganze Leben und alle Bevölkerungsgruppen gelten, beziehen sich arbeitsmedizinische Grenzwerte (AGW) auf gesunde Erwachsene und eine 40-Stunden-Woche.

Festgelegt werden die AGW vom Ausschuss für Gefahrstoffe des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales auf Basis der sogenannten **MAK-Werte**. Die Abkürzung MAK steht für Maximale Arbeitsplatz-Konzentration; die entsprechenden Werte werden von der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft ermittelt.

Der MAK-Wert für Stickstoffdioxid beruft sich vor allem auf tierexperimentelle **Inhalationsstudien** und **Beobachtungen** an Versuchspersonen. Dabei werden Substanzen in unterschiedlicher Konzentration verabreicht, um die Schwelle zwischen Unbedenklichkeit und Schädlichkeit näherungsweise zu ermitteln. In einem Experiment atmeten Versuchstiere bis zu 13 Wochen lang die sehr hohe Stickstoffdioxidkonzentration von $4.066 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ein; sie entspricht dem etwa Hundertfachen des Jahresmittel-Grenzwerts für die Umgebungsluft. Selbst bei dieser hohen Konzentration zeigten die Tiere keine gesundheitlichen Schäden. Ausgehend von dem tierexperimentell bestimmten Schwellenwert und mit Blick auf Ergebnisse von Versuchen an Menschen, wurde nach den Regeln der Kommission eine maximale Arbeitsplatzkonzentration für Stickstoffdioxid von $950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ abgeleitet. Der Wert stammt aus dem Jahr 2010 und wurde seither mehrfach überprüft und bestätigt.

Bei der Festlegung von Grenzwerten für die Allgemeinbevölkerung orientiert sich die EU an Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO), den sogenannten Luftqualitätsleitlinien. Darin werden nicht Grenzwerte, sondern **Richtwerte** genannt. Zuletzt hat die WHO ihre Luftqualitätsleitlinien zum Schutz der menschlichen Gesundheit vor Schadstoffen im Jahr 2005 aktualisiert; 2020 soll eine Neufassung erscheinen. Die Richtwerte beruhen auf Laborstudien an Zellen und Tieren, Experimenten an Menschen (Kammerexperimente) sowie auf Erkenntnissen umweltepidemiologischer Studien, die Wissenschaftler aus aller Welt für die WHO zusammentragen und auswerten. Eine Expertengruppe der WHO führte im Jahr 2013 eine Sonderauswertung für die EU-Kommission durch; ihre Analysen zeigten auch unterhalb der zurzeit bestehenden EU-Grenzwerte relevante Gesundheitseffekte.

Abweichungen zwischen EU-Grenzwerten und WHO-Richtwerten gibt es vor allem beim **Feinstaub**. So empfiehlt die WHO beim Jahresmittelwert für die Größenklasse PM_{10} $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$; der EU-Grenzwert ist mit $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jedoch doppelt so hoch. Als Richtwert für $\text{PM}_{2,5}$ benennt die WHO $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – der europäische Grenzwert ist mit $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mehr als doppelt so hoch. Demgegenüber entspricht der EU-Grenzwert für die mittlere Jahresbelastung mit Stickstoffdioxid mit $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ exakt dem Richtwert der Weltgesundheitsorganisation.

Wie der Blick über die Grenzen zeigt (Tabelle 4.2), werden die Empfehlungen der WHO weltweit sehr unterschiedlich umgesetzt. In den **USA** geht man im Vergleich zur EU

Tabelle 4.2: Grenzwerte für Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀) sowie Stickstoffdioxid (NO₂) in ausgewählten Ländern (Quelle: Kutlar Joss et al. 2017).

Staat	Grenzwerte für Stickstoffdioxid (NO ₂) in µg/m ³			Grenzwerte für Feinstaub (PM _{2,5}) in µg/m ³		Grenzwerte für Feinstaub (PM ₁₀) in µg/m ³	
	Stunden-mittelwert	Tages-mittelwert	Jahres-mittelwert	Tages-mittelwert	Jahres-mittelwert	Tages-mittelwert	Jahres-mittelwert
EU/ Deutschland	200	–	40	–	25	50	40
Argentinien	–*	–*	–	–*	–*	–*	–*
Australien	230	–	60	25	8	50	–
Brasilien	320	–	100	–	–	150	50
China	200	80	40	75	35	150	50
Indien	–	80	40	60	40	100	60
Indonesien	–	150	100	–	–	150	–
Japan	–	113	–	35	15	100	–
Kanada	–	–	–	28	10	–	–
Mexiko	395	–	100	45	12	75	40
Russland	–*	–	40	35	25	60	40
Saudi-Arabien	660	–	100	35	15	340	80
Südafrika	200	–	40	65	25	120	50
Südkorea	190	115	57	50	25	100	50
Türkei	300	–	–	–	–	100	60
Vereinigte Staaten	188	–	100	35	12	150	–

*: abweichende Maßzahlen

umgekehrt vor: Dort liegt der Grenzwert für PM_{2,5}-Feinstaub mit 12 µg/m³ nahe am Richtwert der WHO, bei Stickstoffdioxid jedoch übersteigt er den WHO-Richtwert mit 100 µg/m³ deutlich. Andererseits gelten in den USA strengere Emissionsgrenzwerte.

Die **Schweiz** hat die Empfehlungen der WHO von 2005 für Feinstaub übernommen und für Stickstoffdioxid mit einem Grenzwert für die mittlere Jahresbelastung von 30 µg/m³ sogar unterschritten. Doch trotz des niedrigeren NO₂-Jahresmittelwerts besteht eine mit Deutschland vergleichbare reale Situation: Entlang von Hauptverkehrsstraßen wird der Grenzwert überschritten. So wurden etwa in Zürich im Jahresmittel 2016 NO₂-Werte um 50 µg/m³ an verkehrsnahen Messstellen bestimmt. Auch Öster-

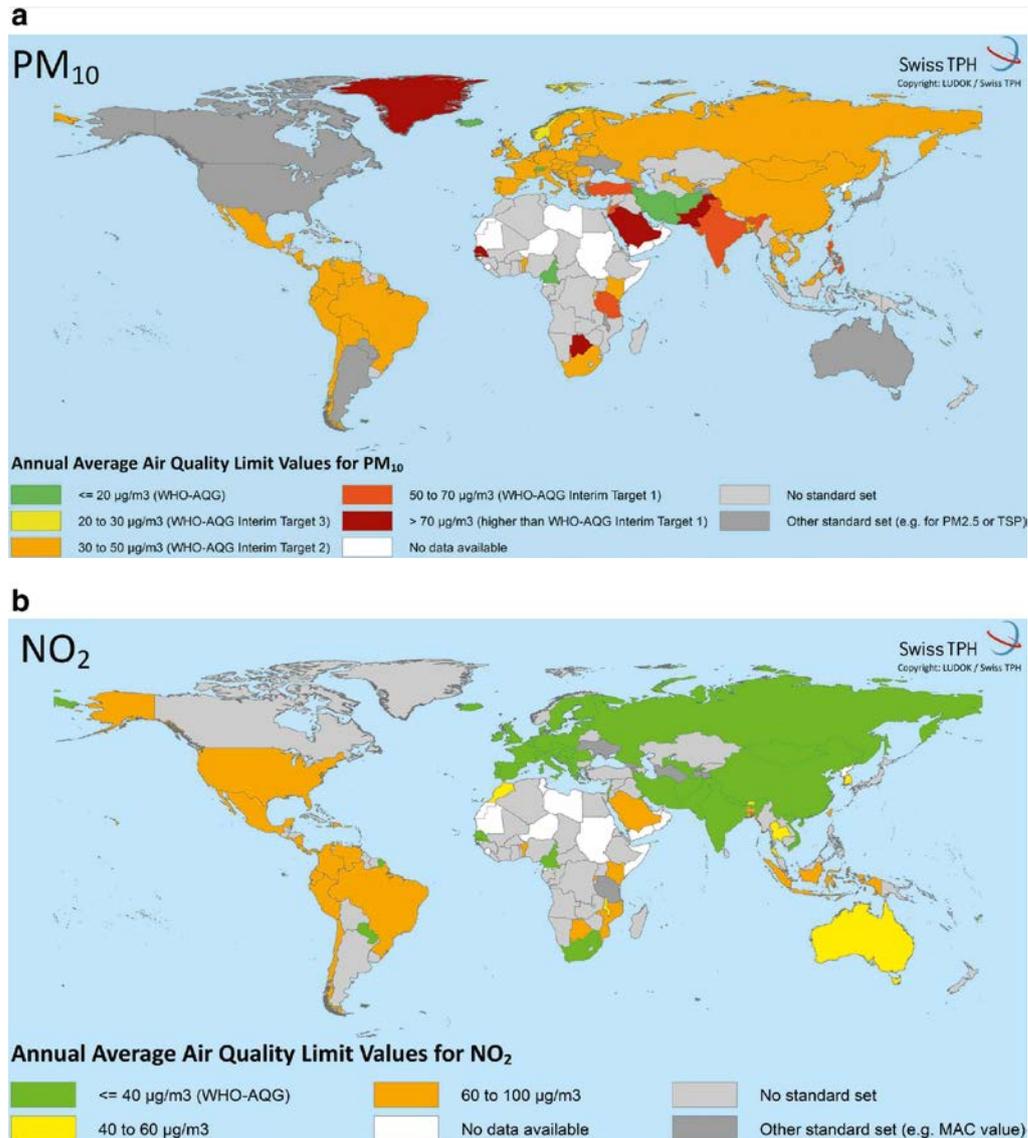


Abbildung 4.1: Grenzwerte für Feinstaub (PM₁₀) und Stickstoffdioxid (NO₂) in ausgewählten Ländern (Quelle: Kutlar Joss et al. 2017). Abgedruckt unter Creative Commons-Lizenz CC-BY 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

reich hat einen niedrigeren Grenzwert (35 µg/m³ einschließlich Toleranzmarge). Die Feinstaub-Richtwerte der WHO haben bisher sieben Länder als Grenzwerte übernommen. In der Praxis werden die WHO-Richtwerte in vielen Regionen der Welt jedoch überschritten. Die Karten in Abbildung 4.1 geben einen Überblick über die weltweit geltenden Grenzwerte für Feinstaub (PM₁₀) und Stickstoffdioxid (NO₂).

Die unterschiedlichen Regelungen in verschiedenen Ländern zeigen jeweils eigene Wege auf, wie ein Schutz vor Luftschadstoffen erreicht werden soll und wie die Bedeutung der verschiedenen Schadstoffe bewertet wird. So entspricht der Fokus der USA auf Feinstaub statt auf Stickstoffdioxid der größeren gesundheitlichen Bedeutung des Feinstaubes, wie sie in Kapitel 3 dargelegt wurde. Andererseits tragen in den USA strengere Emissionsgrenzwerte zur Erreichung geringerer Immissionswerte bei. In Kapitel 2 wurde allerdings schon darauf hingewiesen, dass solche internationalen Vergleiche durch unterschiedliche Messbedingungen erschwert sind.

Ein besonderes Problem besteht bei Schadstoffen ohne bekannte untere Wirkungsschwelle, wie es besonders bei Feinstaub offenbar der Fall ist. In diesen Fällen muss auch unterhalb dieser Grenzwerte mit gesundheitlichen Effekten gerechnet werden.

Nach dem Vorsorgeprinzip wäre hier eine Reduktion der Grenzwerte bis in den Bereich der Hintergrundbelastung anzustreben.

Doch es sind nicht allein die möglichen Gesundheitsauswirkungen, die Einfluss auf die Grenzwertsetzung haben. Eine Rolle spielt auch der Aufwand, der erforderlich ist, um den Grenzwert einzuhalten. Berücksichtigt werden auch die möglichen weiteren Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft, die mit der jeweiligen Höhe des Grenzwerts verbunden sind. Das Ziel ist eine **Äquivalenz** zwischen dem Aufwand zur Umsetzung des Grenzwerts und dem Ertrag, also den Folgen für Gesundheit, Wirtschaft und Gesellschaft. Oder anders ausgedrückt: Es geht um die Verhältnismäßigkeit der Maßnahmen, die mit der Setzung von Grenzwerten verbunden sind.

Bei Stickstoffdioxid ist zum Beispiel zu fragen, ob innerstädtische Fahrverbote verhältnismäßig sind, wenn dadurch bloß geringfügige Verbesserungen der Luftqualität erzielt werden können. Mit den Mitteln der **Wissenschaft** lassen sich die direkten und indirekten Kosten zur Durchsetzung des Grenzwerts und die Auswirkungen eines verringerten gesundheitlichen Risikos ermitteln und häufig auch in Zahlen fassen.

Ob der Aufwand jedoch den Ertrag rechtfertigt, ist eine **politische Frage**, die in demokratischen Systemen die dazu legitimierten Gremien beantworten müssen. Ein informierter und offener Diskurs in der Öffentlichkeit unter Einbeziehung von Expertenwissen kann zu einer ausgewogenen und rational vertretbaren Entscheidungsfindung beitragen. Der Wissenschaft kommt dabei die Aufgabe zu, den Prozess der Entscheidung mit bestmöglichem Wissen zu unterstützen, das Ergebnis der Abwägung aber nicht vorab zu bestimmen.

Sind die **Grenzwerte** aber einmal festgelegt, sind sie auch verbindlich. Dann können Überlegungen zur Verhältnismäßigkeit nur noch in begrenztem Maße berücksichtigt werden. Das gilt vor allem für europäische Grenzwerte, die von Deutschland übernommen wurden.

Literatur

- Amann M, Holland M, Maas R, et al. (2017) Costs, benefits and economic impacts of the EU clean air strategy and their implications on innovation and competitiveness. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/clean_air_outlook_economic_impact_report.pdf [Stand: 05.04.2019]
- Kutlar Joss M, Eeftens M, Gintowt E, et al. (2017) Time to harmonize national ambient air quality standards. *Int. J. Public Health* 62: 453-462.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft, MAK-Kommission, Stickstoffdioxid (2010) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/3527600418.mb1010244d0049> [Stand: 05.04.2019]
- Reinhardt M (2015): Grenzwerte – Fluch oder Segen? *Natur und Recht* 37: 289–297.
- Senders J (2018): Der „Dieselkompromiss“ im Lichte zunehmender Fahrverbote – Bestandsaufnahme und rechtspolitischer Ausblick, *JuWissBlog* Nr. 89/2018v. 23.10.2018, <https://www.juwiss.de/89-2018/> [Stand: 05.04.2019]
- WHO (2006) Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen: WHO Regional office for Europe.
- WHO (2013) Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP. Technical Report. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- WHO (2013) Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

5. Rechtlicher Rahmen

Die deutsche Luftreinhaltepolitik wird wie die anderer EU-Länder weitgehend durch **europäisches Recht** bestimmt. Die darin festgelegten Grenzwerte für Luftschadstoffe sind von allen Mitgliedsstaaten einzuhalten, Messverfahren und Aufstellungsbedingungen von Messstationen sind in Grundzügen geregelt und die Erstellung wirksamer Luftqualitätspläne bei Überschreitung der Grenzwerte vorgeschrieben. Insgesamt gewährt das Unionsrecht dem nationalen Gesetzgeber wenig Spielraum für eine eigene Luftreinhaltepolitik. Die Gestaltungsmöglichkeiten beschränken sich im Wesentlichen auf kurzfristige Gegenmaßnahmen bei Grenzwertüberschreitungen. Dabei kommt es in der Praxis durchaus zu gewissen Inkonsistenzen.

Grundlage des **europäischen Luftreinhalterechts** sind der Vertrag über die Europäische Union, die Grundrechtecharta und der seit 2009 geltende Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV). Artikel 191 AEUV macht es der Union zur Aufgabe, zum Schutz von Umwelt und menschlicher Gesundheit beizutragen. Leitend ist das Vorsorgeprinzip mit seinem hohen Schutzniveau: Es zielt auf die Minimierung von Risiken ab und rechtfertigt Regulierungen unterhalb der Gefahrenschwelle. In diesem Sinne erließ der europäische Gesetzgeber erstmals 1996 eine Luftqualitätsrichtlinie. Sie wurde durch die bis heute gültige 2008 verabschiedete Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21.05.2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa ersetzt (1).

Das **Ziel der Richtlinie** ist klar: Emissionen von Luftschadstoffen sollen vermindert, verhindert oder verringert und angemessene Luftqualitätsziele festgelegt werden, wobei die Richtwerte der WHO zu berücksichtigen sind (2). Als Schadstoffe, für die Grenzwerte und Verfahren festgelegt werden, nennt die Richtlinie Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide sowie Partikel (3). Beurteilungsverfahren, Beurteilungskriterien, Probenahmestellen und Referenzmessmethoden werden in Anhängen der Richtlinie näher geregelt.

Kernstück der Richtlinie sind Regelungen von **Grenzwerten** und Alarmschwellen – etwa für Stickstoffdioxid, Feinstaub, Blei, Benzol – zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Die Mitgliedsländer müssen demnach sicherstellen, dass die Messwerte für die erfassten Schadstoffe die festgelegten Grenzwerte an keinem Ort ihres Staatsgebiets überschreiten. Die Grenzwerte des Unionsrechts sind für den deutschen Gesetzgeber nicht etwa bloße planerische Zielwerte. Art. 13 Abs. 1 UA 2 sagt unübersehbar deutlich: „Grenzwerte ... dürfen nicht (mehr) überschritten werden“. Die Grenzwerte sind also bindend; der nationale Gesetzgeber darf sie allenfalls verschärfen. Als Mittel gegen eine Überschreitung der Grenzwerte sind Luftqualitätspläne zur Immissionsminimierung vorgeschrieben. Welche Maßnahmen darin verfügt werden, bleibt dem nationalen Gesetzgeber überlassen. Hier hat er einen gewissen prognostischen und planerischen Spielraum.

Eine erhebliche Bedeutung für die Frage, ob Grenzwerte überschritten sind, kommt der Positionierung von **Probenahmestellen** zu. Damit zusammenhängende Fragen sind derzeit Gegenstand eines Verfahrens am Europäischen Gerichtshof (4). Probenahmestellen dienen dem Ziel, so heißt es im die Entscheidung vorbereitenden Votum der Generalanwältin, „Bereiche..., in denen die höchsten Konzentrationen auftreten“, zu identifizieren (5). Da es um hochrangige Rechtsgüter wie das Recht auf Leben und die Umweltschutzstandards der EU gehe, argumentiert die Generalanwältin, müssten die Behörden „im Zweifel eine Strategie wählen, die das Risiko minimiert, Grenzwertüberschreitungen nicht festzustellen“ (6).

In dieser Perspektive könnte die Frage der aus wissenschaftlicher Sicht richtigen Positionierung von Probenahmestellen zur Erfassung der repräsentativen mittleren Jahresbelastung, für die der Wert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anzuwenden ist, künftig zum Streitgegenstand vor den Verwaltungsgerichten werden (siehe auch Kapitel 2 und 4).

In **deutsches Recht** übertragen wurde das europäische Luftreinhalterecht im Jahr 2010. Seither sind die europäischen Schadstoff-Grenzwerte in einer Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (39. BImSchV) verankert (7). Werden die Immissionsgrenzwerte überschritten, muss die zuständige Behörde in Übereinstimmung mit dem Unionsrecht einen **Luftreinhalteplan** aufstellen, der die erforderlichen Maßnahmen zur dauerhaften Verminderung von Luftverunreinigungen festlegt (§ 47 Abs. 1 BImSchG). Andere Maßnahmen als den Erlass von Luftreinhalteplänen sieht das nationale Bundesimmissionsschutzrecht nicht vor.

Für die Situation, dass Grenzwerte trotz vorliegenden Luftreinhalteplans überschritten werden, besteht also ein Regelungsdefizit. Demgemäß war die rechtliche Grundlage für streckenbezogene oder zonale **Verkehrsverbote** für Dieselfahrzeuge nach Überschreitung des Stickstoffdioxid-Grenzwerts unklar. Das Bundesverwaltungsgericht hat in seiner Entscheidung zu den Fahrverboten in Stuttgart vom 27.02.2018 hier für Klarheit gesorgt, indem es unmittelbar auf das Richtlinienrecht der Union zugriff (8). Zu den dort erwähnten kurzfristigen Maßnahmen zur Luftreinhaltung gehören auch solche „zur Aussetzung von Tätigkeiten“, soweit diese zur Gefahr der Grenzwertüberschreitung beitragen. Die Richtlinie weist ausdrücklich darauf hin (Art. 24 Abs. 2), dass dazu auch Maßnahmen in Bezug auf den Kraftverkehr gehören können (9).

Insofern sind also strecken- oder gebietsbezogene Fahrverbote für schadstoffintensive Fahrzeuge unionsrechtlich geboten, sofern sie verhältnismäßig sind. In seiner Begründung unterstreicht das Bundesverwaltungsgericht den Grundsatz der **Verhältnismäßigkeit** als Rechtsgrundsatz des Unionsrechts. Das Gericht bezieht den Grundsatz vor allem auf die Gestaltung etwaiger Verbotszonen und die Belastungsintensität einzelner Betroffener (10).

Der Bundesgesetzgeber greift diesen Hinweis jetzt mit dem Dreizehnten Gesetz zur **Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes** auf, bezieht ihn aber auf die Eingriffsschwelle des Grenzwerts. Nach dem neuen § 40 Abs. 1a soll zum Mittel des Diesel-Fahrverbots „in der Regel“ nur noch wegen einer Überschreitung eines Grenzwerts von 50 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) im Jahresmittel gegriffen werden können. Dass der nationale Gesetzgeber die Grenzwerte des Unionsrechts nicht „nachbessern“ darf, liegt auf der Hand und ist von den Verwaltungsgerichten Köln und Berlin in Nebenbemerkungen zu den Plänen der Bundesregierung auch schon geäußert

worden. Käme es zu einem Rechtsstreit, dürften die entscheidenden Verwaltungsgerichte eine die europäischen Grenzwerte verändernde nationale Regelung nicht anwenden. Es bliebe also bei dem EU-rechtlich vorgegebenen Grenzwert.

Vor diesem Hintergrund beruft sich die Bundesregierung auf den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit und knüpft an die zeitliche Komponente des unmittelbar anwendbaren EU-Rechts an. Danach muss der Zeitraum der Nichteinhaltung des Grenzwerts so kurz wie möglich gehalten werden. Eine Grenzwertüberschreitung ist also kurzzeitig tolerabel. Die Bundesregierung geht davon aus, dass die Überschreitung um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in einem „überschaubaren Zeitraum“ nicht mehr eintreten werde, weil sie in ihrem „Konzept für saubere Luft in unseren Städten“ Maßnahmen zur Belastungssenkung ergriffen habe. Vermutlich wird die Frage noch den Europäischen Gerichtshof beschäftigen.

Literatur

- (1) Richtlinie 2008/50/EG des Rates und des Europäischen Parlaments vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft in Europa (ABl. L 152 v. 11.6.2008, S. 1); zit. als „RL“.
- (2) Siehe den Erwägungsgrund 2 der zitierten RL und Art. 1 Nr. 5 der RL: „Erhaltung der Luftqualität dort, wo sie gut ist, und Verbesserung der Luftqualität, wo das nicht der Fall ist.“
- (3) „Schadstoff ist jeder in der Luft vorhandene Stoff, der schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und/oder die Umwelt insgesamt haben kann.“ So die Definition in Art. 2 Nr. 2 der RL
- (4) Rs. C-723/17 – Lies Craeynest u.a. ./ Brussels Hoofdstedelijk Gewest u.a., Schlussanträge der Generalanwältin Juliane Kokott; die Positionierung der Standorte ist in Art. 7 Abs. 1 und Anhang III Abschnitt B Nr. 1 Buchst. a) erster Spiegelstrich und Buchst. b) RL angesprochen, ohne zur richtigen Positionierung naturwissenschaftliche Methoden o.ä. vorzugeben.
- (5) So beschreibt die Vorlageentscheidung den Zweck der Positionierung der Probenahmestellen.
- (6) S. Rn. 55 der Schlussanträge in der Rs. C-737/17.
- (7) 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065)
- (8) Zit. in N. 6
- (9) In Art. 24 Abs. 2 RL heißt es: „In diesen Plänen für kurzfristige Maßnahmen gemäß Abs. 1 [Abs. 1 behandelt den Fall, dass in einem bestimmten Gebiet die Alarmschwellen überschritten werden] können im Einzelfall wirkungsvolle Maßnahmen zur Kontrolle und, soweit erforderlich, zur Aussetzung der Tätigkeiten vorgesehen werden, die zur Gefahr einer Überschreitung der entsprechenden Grenzwerte, Zielwerte oder Alarmschwellen beitragen.“
- (10) BVerwG, v. 27.02.2018 -BVerwG 7 C 30.17 – Rn. 34

6. Luftschadstoffe und Verkehr

In den vorigen Kapiteln wurde dargestellt, dass der Verkehr eine wesentliche Quelle für die Belastung der Luft an Hauptverkehrsstraßen mit Stickstoffdioxid ist, insbesondere durch ältere Dieselfahrzeuge. Eine deutlich höhere gesundheitliche Bedeutung als Stickstoffdioxid hat jedoch Feinstaub, der aus vielen primären und auch sekundären Quellen stammt. Auch hier steht der Straßenverkehr im Fokus. Daher widmet sich das folgende Kapitel in erster Linie der verkehrsbedingten Belastung der Luft. Die Bedeutung weiterer Quellen, auf die hier nur exemplarisch eingegangen wird, soll in einer späteren, ausführlicheren Stellungnahme der Leopoldina näher beleuchtet werden. Diese weiteren Quellen treten umso mehr in den Vordergrund, je stärker die durch den Verkehr verursachten Emissionen gesenkt werden.

Emissionen auf deutschen Straßen

Betrachtet man die spezifischen Schadstoff-Emissionen im Verkehr, so ist der Rückgang seit 1995 beeindruckend. Die Emissionen pro zurückgelegtem Fahrzeugkilometer im PKW-Bereich nahmen seither erheblich ab. Innerhalb von 22 Jahren, zwischen 1995 und 2017, sank der Ausstoß von Schwefeldioxid um rund 98 %, bei flüchtigen organischen Chemikalien ohne Methan (NMVOC) um etwa 87 %, bei den direkten Feinstaubemissionen um 79 % und bei Stickstoffoxiden um 56 %. Die Kohlenstoffdioxid-Emissionen reduzierten sich um 15 %. Bessere Motoren, eine ausgeklügelte Abgastechnik und höhere Kraftstoffqualitäten ließen auch im LKW-Verkehr die spezifischen Emissionen zurückgehen: bei Schwefeldioxid um mehr als 99 %, bei Kohlenstoffdioxid um rund 30 %.

Zu Überschreitungen von Luftschadstoff-Grenzwerten kommt es im Straßenverkehr ausschließlich bei Stickstoffdioxid. Hauptverursacher sind Dieselfahrzeuge unterhalb von Euro-6d-Temp beziehungsweise Euro VI. An der PKW-Fahrzeugflotte in Deutschland haben solche Dieselfahrzeuge einen Anteil von 33 %; Nutzfahrzeuge haben praktisch alle einen Dieselantrieb (siehe Kasten 6.1).

Blickt man auf die *absoluten* Schadstoff-Emissionen, trübt sich das Bild ein. So sind die gesamten Stickstoffoxid-Emissionen durch den PKW-Verkehr von 1995 bis 2017

Kasten 6.1: Die deutsche Dieselflotte

Von den 46,5 Millionen in Deutschland angemeldeten PKW haben 15,2 Millionen einen Dieselantrieb. Davon entsprechen 37 % den Euro-Normen 1 bis 4, die jetzt im Mittelpunkt der Diskussion um Fahrverbote in Innenstädten stehen. Dieselfahrzeuge der Euro-Normen 5 bis Euro-6d-Temp (neueste Abgasnorm) haben einen Anteil von 63 %. Sollten auch Euro-5-Fahrzeuge in die Fahrverbote einbezogen werden, sind 75 % der Dieselflotte betroffen.

Bei Nutzfahrzeugen im Wirtschaftsverkehr handelt es sich nahezu ausschließlich um Dieselfahrzeuge. Die PKW im Wirtschaftsverkehr sind mehrheitlich nicht älter als vier Jahre und aufgrund moderner Abgastechnik von möglichen Fahrverboten wenig betroffen.

Kasten 6.2: Verkehrsleistung

Seit Jahren steigt die Verkehrsleistung hierzulande, und zwar sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr. Der Fachbegriff Verkehrsleistung bezeichnet das Produkt aus beförderter Menge und zurückgelegter Entfernung. Im Jahr 2017 wurde der wesentliche Teil der Verkehrsleistung im Personenverkehr, nämlich mehr als 86 %, auf der Straße erbracht – davon gut 80 % im motorisierten Individualverkehr und knapp 7 % im öffentlichen Straßenpersonenverkehr. Hinzu kommt eine Güter-Transportleistung von 491 Milliarden Tonnenkilometern. In Fahrleistung ausgedrückt waren das 623 Milliarden PKW- und 121 Milliarden Nutzfahrzeug-Kilometer im aktuellsten Berichtsjahr 2014.

nur um 48 % gesunken und die direkten Feinstaubemissionen um 76 %. Die absoluten Kohlenstoffdioxid-Emissionen sind sogar um 0,5 % angestiegen. Und im LKW-Verkehr haben sich die gesamten CO₂-Emissionen zwischen 1995 und 2017 trotz technischer Verbesserungen sogar von 34,2 auf 41,0 Millionen Tonnen erhöht – das entspricht einem Plus von gut 20 %.

Grund für die Diskrepanz zwischen der Entwicklung der spezifischen und absoluten Emissionen ist der stark zunehmende Verkehr auf den Straßen (siehe Kasten 6.2). Die Verkehrsprognose des Bundes geht von einem weiteren Zuwachs aus. Beim motorisierten Individualverkehr rechnet man bis 2030 mit einem Plus von 10 % und im Straßengüterverkehr mit 17 % Zuwachs im Vergleich zum Stand von 2010. Angesichts wachsender Effizienz bei den Antrieben sei bis 2030 ein Rückgang des PKW-Energiebedarfs um 27 % zu erwarten, heißt es in der Verkehrsprognose.

Europäische Rahmenbedingungen

Zunehmend problematisch werden die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors. Ebenso wie in anderen Wirtschaftssektoren, die nicht unter das EU-Emissionshandelssystem fallen, ist hier der Kohlendioxidausstoß bis 2030 deutlich zu reduzieren. Durch die EU-Lastenteilungsverordnung wurde diese Verpflichtung für alle Mitgliedstaaten in verbindliche Jahresziele für CO₂-Reduktionen von 2021 bis 2030 umgesetzt. Für Deutschland ergibt sich daraus ein Gesamtminderungsziel von 38 % bis 2030 für die Sektoren Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft im Vergleich zu 2005. Die Mitgliedstaaten sind selbst für nationale Strategien und Maßnahmen zur Begrenzung der Emissionen verantwortlich. Ein Ziel des vorliegenden Entwurfs für ein Bundes-Klimaschutzgesetz ist es, nationale Ziele für die einzelnen Sektoren festzulegen.

Bei Überschreiten der jährlichen Emissionsobergrenze können Emissionsrechte von anderen Mitgliedsstaaten gekauft werden, deren Emissionen unterhalb der Zielmarke liegen. Aus den Eckpunkten des Bundesfinanzministeriums zum Finanzplan bis 2023 geht hervor, dass die Bundesregierung ab dem Jahr 2020 mit Zahlungen für solche Länderemissionsrechte rechnet. Für 2020 bis 2022 sind dafür pro Jahr 100 Millionen Euro eingeplant. Die Höhe der tatsächlichen Zahlung wird vom Ausmaß der Emissionsüberschreitung und dem Kaufpreis für Emissionsrechte im Rahmen der Lastenteilungsverordnung abhängen. Eine umfassende Umgestaltung des Verkehrssystems ist daher auch aufgrund des Drucks durch die EU-Lastenteilungsverordnung notwendig.

Zielsetzungen und Zielkonflikte, Maßnahmen und ihre Wirkungen

Eine besondere Herausforderung liegt im Verkehrsbereich in der möglichst umfangreichen Reduzierung von negativen Effekten, die sich aus dem Verkehr fast zwangsläufig

ergeben. Den Zielen Komfort, Geschwindigkeit und Bezahlbarkeit stehen Kapazitätsengpässe, Emissionen von klimaschädlichen Gasen, Luftschadstoffen und Lärm, Unfälle mit Personen- und Sachschäden sowie Flächenverbrauch für den fließenden und den ruhenden Verkehr gegenüber. Neben **fahrzeugtechnischen Lösungen** stehen Maßnahmen der **Verkehrssteuerung** durch technische Systeme sowie preisliche und steuerliche Instrumente zur **Verhaltensbeeinflussung** zur Verfügung.

1. Antriebstechnik

Verbrennungsmotoren:

Die Entwicklung der Stickstoffoxid-Emissionen im Verkehrssektor hängt davon ab, wie schnell moderne Antriebe in den Markt gelangen. Entscheidend dafür sind neben den politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen vor allem auch das Fahrzeugangebot und die Kundennachfrage. Verbesserungen hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionen von Stickstoffoxiden und Feinstaubpartikeln durch Verbrennungsmotoren werden seit Jahren erzielt und sind aufgrund technischer Weiterentwicklungen auch in Zukunft zu erwarten. Zu den Fortschritten tragen unter anderem Start-Stopp-Systeme, 48-Volt-Technik, variable Ventilsteuerung, Turboaufladung und Hubraumreduktion (Downsizing) bei. Auch die motornaher Anordnung der Abgasnachbehandlung bei Diesel-PKW, die Einführung von Partikelfiltern bei Ottomotoren, optimierte Getriebe, eine verbesserte Aerodynamik und Leichtbaumaßnahmen führen zur Minderung von Stickstoffoxid- und Partikelemissionen.

E-Mobilität:

Die Verwendung von Elektromotoren als Antrieb von Fahrzeugen dürfte zu einer zügigen Senkung der verkehrsbezogenen Luftbelastung beitragen. So ist selbst bei moderater Entwicklung der technologischen, wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen zu erwarten, dass im Jahr 2030 bis zu 15 % aller neu verkauften PKW auf dem EU-Neuwagenmarkt rein batterieelektrisch betrieben werden und rund 40 % teilelektrifiziert sind – als Mild-Hybride, Voll-Hybride und Plug-in-Hybride. Schätzungen zufolge sinkt der Verkaufsanteil reiner Diesel-PKW-Neufahrzeuge bei dieser Entwicklung auf unter 6 %. Bei besonders förderlicher Entwicklung der Rahmenbedingungen sind im Jahr 2030 voraussichtlich bis zu 50 % aller Neuzulassungen rein elektrisch und circa 45 % in Teilen elektrifiziert. Der Dieselanteil würde dann noch weiter sinken.

Ein Treiber der Elektromobilität sind die Kohlenstoffdioxid-Emissionsstandards der EU für neue PKW. Ab 2030 begrenzen sie den CO₂-Ausstoß der Neufahrzeugflotte auf durchschnittlich höchstens 59 Gramm pro Kilometer, wobei E-Fahrzeuge als vollkommen klimaneutral gewertet werden. Schätzungen der Europäischen Kommission zufolge könnten diese Standards europaweit zu einem Elektrofahrzeuganteil von etwa 12 % führen und die Stickstoffoxid-Emissionen um rund 42 % senken. Bereits heute verursachen Elektrofahrzeuge, die mit einem durchschnittlichen europäischen Strommix betrieben werden, niedrigere Treibhausgasemissionen in ihrem Lebenszyklus (inklusive Batterieproduktion) als herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Auch bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen entsteht Feinstaub. Elektromobilität dürfte aber zur Reduzierung der Feinstaubbelastung durch Bremsen- und Reifenabrieb beitragen. Ermöglicht wird dies vor allem durch regenerative Bremssysteme in Hybrid- und E-Fahrzeugen. Dadurch kommen die konventionellen Bremsen weniger zum Einsatz; der Abrieb fällt geringer aus.

Kasten 6.3: Nachrüstung von Diesel-PKW

Die technische Herausforderung bei der Nachrüstung von Diesel-PKW beginnt bei der motorfernen Anordnung des Katalysators. Dadurch ist er nur schwer auf Betriebstemperatur zu bringen, vor allem im Stadtfahrbetrieb. Es sind aufwändige Heizstrategien erforderlich, die zu einem Kraftstoffmehrverbrauch und damit einer Erhöhung der CO₂-Emission führen. Eine weitere Herausforderung für die Minderung der Stickstoffoxid-Emissionen stellt bei Systemen, die auf der Verwendung von wässriger Harnstofflösung basieren, die Erzeugung des Ammoniaks durch Aufbereitung von sogenanntem AdBlue dar. Die aktuell vom ADAC getesteten Systeme basieren alle auf AdBlue als Reduktionsmittel. Am Markt sind andere Systeme bekannt, die technisch auf einer anderen Art der Bereitstellung des Ammoniaks basieren. In diesen Systemen, die 2018 den Horizon-Preis der EU gewonnen haben, wird Ammoniak in Kartuschen gespeichert und kann direkt dem Abgas beigegeben werden. Dadurch wird die gesamte Problematik der Aufbereitung des AdBlue vermieden, die gegenwärtig in der Entwicklung der Systeme, die der ADAC testet, eine gewisse Herausforderung bezüglich der Bildung von Ablagerungen und/oder der Erfordernis einer bestimmten Energie zur Aufbereitung der flüssigen Harnstofflösung darstellen. Die vom ADAC getesteten, auf der Verwendung von AdBlue basierenden End-of-pipe-Systeme werden als noch nicht serienreif bezeichnet.

Nachrüstung von Dieselfahrzeugen:

Nicht nur in der Industrie, auch für Fahrzeuge ist die Nachrüstung von Abgasreinigungssystemen seit Langem bekannt. Man unterscheidet zwischen der Nachrüstung von Katalysatoren, Partikelfiltern und der Nachrüstung von Systemen zur Minderung der Stickstoffoxid-Emissionen (sogenannte SCR-Systeme).

Die Nachrüstung von Katalysatoren zur Emissionsminderung von benzinbetriebenen PKW ist aus den 1980er-/1990er-Jahren bekannt und gilt als erfolgreich. Die technisch komplexe Nachrüstung von Diesel-PKW mit Partikelfiltersystemen in den 2000er-Jahren ist ein weiteres bekanntes Beispiel. Aus heutiger Perspektive wird diese Nachrüstung sehr kritisch gesehen. Tatsächlich wurden in Teilen wirkungslose Systeme nachgerüstet. Mit der Filternachrüstung ging durch die Verwendung von besonders wirksamen Oxidationskatalysatoren eine hohe Stickstoffdioxid-Emission einher.

Bei Bussen bewährt sich die SCR-Nachrüstung seit Jahren im Routinebetrieb. Bei Diesel-PKW ist die wirksame Nachrüstung technisch überaus anspruchsvoll (Kasten 6.3).

Die kürzlich vom ADAC getesteten Nachrüstsysteme erhöhen den Treibstoffverbrauch signifikant und tragen zu einer Steigerung der CO₂-Emission zwischen 0,9 und 28,6 Gramm pro Kilometer bei. Somit ist die Reduktion von NO₂-Emissionen durch Nachrüstsysteme vor dem Hintergrund der beschlossenen CO₂-Reduktionsziele für die PKW-Flotte teuer erkaufte. Hinzu kommt: Ihre Minderungswirkung lässt bei Temperaturen unter 10 Grad Celsius deutlich nach, vor allem im Stadtfahrbetrieb. Sie liegt im Bereich dessen, was allein durch wesentlich einfacher umzusetzende Software-Updates erzielt werden kann.

2. Verkehrssteuerung

Zonale Einfahrtbeschränkungen:

Empirische Analysen für Deutschland zeigen übereinstimmend, dass die Einführung von Umweltzonen zu einer Feinstaubreduktion zwischen 4 und 9 % geführt hat. Auch Beschränkungen für LKW und Ortsumgehungen wirken sich lokal günstig auf die Luftqualität aus. Bei frühzeitiger Ankündigung stellen sich Bevölkerung und Unternehmen

in der Regel auf die Änderungen ein. So stieg die Zahl kommerziell betriebener emissionsarmer Fahrzeuge in Deutschland nach der Einrichtung von Umweltzonen um 88 %. Die Gesamtzahl der Fahrten nahm dadurch nicht ab.

Verkehrsmanagement:

Hier geht es um Maßnahmen zur Kapazitätssteigerung ohne Kapazitätsausbau. Dazu zählt etwa die Verflüssigung des Verkehrs durch die sogenannte grüne Welle. Sie führt nur zu einem geringen oder nur kleinräumigen Rückgang der Schadstoffemissionen. Das gilt im Wesentlichen auch für Verkehrslenkungskonzepte wie zum Beispiel Parkleitsysteme. Die Fahrtenmenge – sie ist wichtig für die Senkung der absoluten Emissionen – wird durch Verkehrsmanagement nicht beeinflusst.

Geschwindigkeitsreduktion:

Heutige Fahrzeuge sind so ausgelegt, dass die Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei etwa 60 Kilometer pro Stunde am geringsten sind. Der Ausstoß von Stickstoffoxiden hängt stark vom Betriebszustand des Katalysators ab; besonders hoch ist er bei Kaltstarts. Tendenziell sinkt die sekundliche Emission bei dem in der Stadt üblichen Fahren ab einer Geschwindigkeit von 30 Kilometer pro Stunde. Geschwindigkeit ist allerdings nur ein Faktor; zusätzlich sind Beschleunigung, Temperatur und Motorauslegung zu berücksichtigen. Die Einrichtung von Tempo-30-Zonen in einer Stadt führt demnach nicht zwangsläufig zu einer Reduktion der emittierten Schadstoffe. Anders verhält es sich bei städtischen Autobahnen: Hier profitiert die Luftqualität nachweislich von Geschwindigkeitsbeschränkungen.

3. Preisliche und steuerliche Instrumente

Ausbau des öffentlichen Verkehrs:

Er spielt eine Schlüsselrolle bei der Senkung von Schadstoffbelastungen durch den Personenverkehr. Die Schaffung neuer U-Bahn-Strecken führt Studien zufolge zu einer Reduktion von Luftschadstoffen um 4 bis 15 %. Durch Gratisangebote nimmt der öffentliche Verkehr zwar zu, der motorisierte Individualverkehr jedoch nur relativ wenig ab. Ein kostenfreier öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) ist eine sinnvolle Ergänzung zu Einfahrverboten oder Mautsystemen und bietet sich als kurzfristig umsetzbare Kompensationsleistung an. In Stoßzeiten mit hohem Verkehrsaufkommen müsste allerdings mit erheblicher Überlastung des bestehenden ÖPNV-Systems gerechnet werden. Erforderlich im Sinne einer nachhaltigen Verkehrswende ist neben dem Ausbau des ÖPNV die Vernetzung verschiedener Verkehrsmittel, sowohl für die individuelle Mobilität als auch für den Gütertransport, sowie die Bereitstellung entsprechender Infrastrukturen.

Differenzierte Maut:

Ein modernes Mautsystem kann sehr effizient zur Steuerung und Optimierung des Verkehrs beitragen. Wichtige Instrumente dabei sind nach Tageszeit oder Einhaltung von Euro-Normen gestaffelte Streckengebühren. Dies erzeugt Anreize, auf weniger belasteten Straßen oder außerhalb der Hauptverkehrszeit zu fahren oder auf den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) umzusteigen. Der Aufbau eines solchen Mautsystems ist jedoch mit erheblichem zeitlichem und finanziellem Aufwand für Kommunen oder private Betreiber verbunden. Beispiele wie Stockholm, Göteborg oder Mailand zeigen, dass ein derartiges System in der Bevölkerung grundsätzlich Akzeptanz findet, wenn der Nutzen deutlich wird und Ausnahmen von der Maut gut begründet werden (Fairness-Argument).

Steuern und Steuerbefreiungen:

Hier sind Kraftstoffsteuern und Kraftfahrzeugsteuern zu unterscheiden. Kraftstoffsteuern sind das Mittel der Wahl, um eine Reduktion der Fahrleistung und damit der absoluten Emissionen zu erzielen. Höhere Treibstoffsteuern führen zu deutlichen Verhaltensänderungen, wie viele Studien zeigen. Kraftstoffsteuern wirken besonders stark bei Vielfahrern und Dieselfahrern. Eine sozialverträgliche Anhebung der Kraftstoffsteuern kann daher einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung von Klima- und Luftqualitätszielen leisten.

Anpassungen der Kraftfahrzeugsteuer nach Umwelt- und CO₂-Standards stärken Studien zufolge das Interesse an emissionsarmen Fahrzeugen, wobei die Effekte der Zulassungssteuern stärker sind als die von jährlichen Steuern. Auch bei der steuerlichen Förderung von Elektroautos ist zu beachten, dass Verbraucher stärker auf sofort wirksame Rabatte und Umsatzsteuerbefreiungen als auf Anreize im Rahmen der Einkommensteuer reagieren.

Von Steuernachlässen profitieren allerdings auch viele Verbraucher, die ohnehin ein solches Fahrzeug kaufen würden – vor allem in Haushalten mit hohem Einkommen. Hier können statt der derzeit einkommensunabhängigen Förderung progressiv gestaltete Subventionen oder Steuernachlässe zum Zuge kommen, um den Elektroauto-Absatz sozial ausgewogen und kosteneffizienter zu fördern. Kalifornien beispielsweise nutzt im Rahmen der Luftreinhaltungspolitik ein zielgerichtetes Flottenmodernisierungsprogramm, das den Umtausch alter Autos für Elektroautos und untere und mittlere Einkommensgruppen fördert. Ein solches Programm kann temporär eine wirksame Maßnahme zur Flottenerneuerung hin zu Elektrofahrzeugen sein. Fiskalisch nachhaltiger und ökonomisch effizienter sind Bonus-Malus-Regelungen bei der Kraftfahrzeugsteuer, die die Elektroauto-Steuvorteile mit deutlichen Steueraufschlägen auf PKW mit hohem Spritverbrauch flankieren.

Ausblick

Mobilität ist ein Garant für Wohlstand und wirtschaftliche Prosperität. Kaum noch jemand zweifelt an der grundsätzlichen Notwendigkeit einer nachhaltigen Verkehrswende hin zu sauberer und vernetzter Mobilität. Ein Hauptgrund ist, dass der Verkehr bisher nicht dazu beiträgt, den Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase den Pariser Klimaschutzziele entsprechend zu verringern. Deutschland hat zudem europarechtliche Verpflichtungen, seine Emissionen im Bereich Verkehr zu reduzieren. Es ist nicht zu sehen, wie diese rechtlich verbindlichen Verpflichtungen ohne ein umfassend neues Verkehrskonzept zu erfüllen sind.

Ein solches Konzept mit längerfristiger Perspektive ist auch der Schlüssel, um andere unerwünschte Begleiterscheinungen des Verkehrs wie die Luftverschmutzung, aber auch Staus, Lärm und Flächenverbrauch wirksam anzugehen. Deutschland war zunächst ein international sichtbarer Vorreiter einer Energiewende. Entschlossenes politisches Handeln kann das Land zum Schrittmacher einer nachhaltigen Verkehrs- und Energiewende machen.

Die Verkehrswende ist mehr als nur eine ökologische Notwendigkeit. Es ist wichtig, nicht bloß einzelne Verkehrsträger oder Antriebskonzepte in den Blick zu nehmen, sondern zielstrebig auf eine zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln (Bahn, ÖPNV,

Kasten 6.4: Weitere Feinstaubquellen und Minderungsmaßnahmen

Durch den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen geht der Anteil des Verkehrssektors an den Feinstaub-Emissionen durch Verbrennungsmotoren und damit deren Anteil an den direkten $PM_{2,5}$ -Immissionen seit Jahren kontinuierlich zurück (siehe Abbildung 6.1). Andere Belastungsquellen hingegen stagnieren auf langjährigem Niveau oder nehmen an Bedeutung zu. Dazu zählen der Abrieb von Fahrzeugen (Bremsen, Reifen) und Holzfeuerungen. Beide Emissionsquellen, vor allem aber die Holzöfen, tragen erheblich zur direkten Feinstaub-Immission in Städten bei. Ein wichtiger Aspekt bei Emissionen aus Holzfeuerungen und Feuerwerken: Sie sind oftmals räumlich und zeitlich stärker begrenzt als andere Quellen. Die Zahl von Holzöfen, deren Installation unter ganz bestimmten Voraussetzungen auch staatlich gefördert wurde und wird, hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Holzöfen (Einzelraumfeuerstellen) emittieren im Alltagsbetrieb häufig deutlich mehr Feinstaub als auf dem Typenschild angegeben. Dazu tragen unter anderem minderwertige Brennstoffe, falsches Anfeuern mit starker Rauchentwicklung und ein schlecht regulierter Verbrennungsprozess bei. Auch wenn nur noch emissionsärmere Öfen installiert werden dürfen und ältere Modelle stillgelegt werden, rangiert ihr Anteil an den direkten Emissionen von $PM_{2,5}$ inzwischen deutlich über dem von Verbrennungsmotoren. Der Beitrag der Holzöfen zur Immission ist regional und saisonal stark unterschiedlich. In Wohngebieten mit vielen Holzöfen werden vor allem in den Abendstunden sehr hohe $PM_{2,5}$ -Immissionswerte gemessen. Über Feinstaub hinaus tragen Holzöfen auch zur Belastung mit Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei.

Wirkungsvolle Gegenmaßnahmen sind weitgehend noch in der Entwicklung. Das gilt etwa für Systeme zur Minderung des Brems- und Reifenabriebs wie Bremsstaubfilter, beschichtete Brems Scheiben und modifizierte Reifen. Für Holzöfen werden derzeit verschiedene Systeme erprobt, die jedoch noch nicht dieselbe Wirksamkeit wie etwa in Fahrzeugen erzielen. Systeme zur Partikelabscheidung von Holzgefeuerten Heizkesseln sind bereits auf dem Markt.

Durch die Anwendung von Abgasreinigungstechnologien nehmen verbrennungsmotorische $PM_{2,5}$ -Primäremissionen deutlich ab. Dadurch rücken andere Primär- und Sekundärquellen wie Abrieb, Holzöfen, und Landwirtschaft zunehmend in den Fokus. Sie sollten im Interesse einer weiteren Reduktion der $PM_{2,5}$ -Belastung stärkere Beachtung finden.

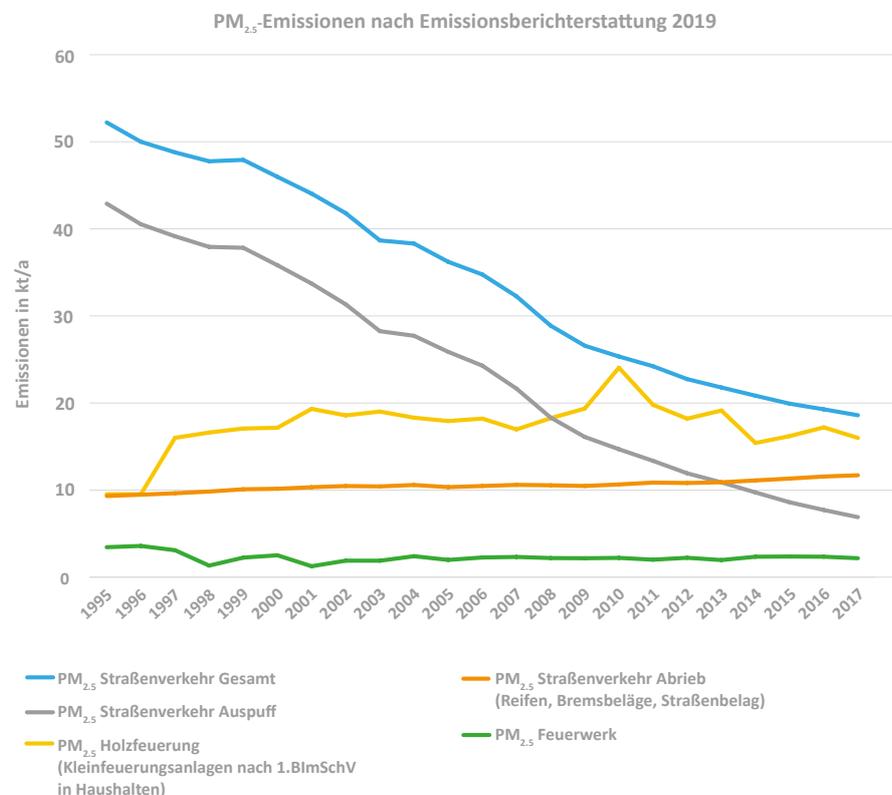


Abbildung 6.1: Direkte Emissionen aus Straßenverkehr (Auspuff, Abrieb, gesamt), Holzfeuerung und Feuerwerk. Zu beachten ist, dass die Sekundäraerosolbildung in der Atmosphäre, die für einen größeren Anteil der $PM_{2,5}$ -Belastung verantwortlich ist, hier nicht erfasst ist (Quelle: Umweltbundesamt, 2019, unveröffentlicht).

PKW, Fahrrad, etc.) integrierte, gesundheitsbewusste, umwelt- und klimafreundliche, bezahlbare Mobilität hinzuarbeiten. Dies benötigt Innovationen, entsprechende Infrastrukturen für individuelle Mobilität und Güterverkehr sowie steuerliche Reformen. Dabei sind Abstimmungen nicht nur national, sondern auch über die Grenzen Deutschlands hinweg erforderlich.

Eine solche Verkehrswende ist auch industriepolitisch sinnvoll. Bezogen auf Antriebe ist eine deutlich steigende Nachfrage nach emissionsfreien Autos zu beobachten. Zudem dringen neue Konkurrenten aus China, Japan und den USA, die auf Elektromobilität mit Batterie- oder Brennstoffzellenantrieb und IT-Dienste rund ums autonome Fahren setzen, immer stärker in das traditionelle Geschäftsfeld der etablierten deutschen Automobilhersteller ein. Diese Markttrends werden sich, unabhängig von politischen Entscheidungen in Deutschland, in absehbarer Zeit nicht ändern.

Entscheidende Argumente sprechen daher für eine aktive Gestaltung der Verkehrswende durch die Politik. Die Rahmenbedingungen, die die deutsche und europäische Politik setzen muss, werden maßgeblich mitbestimmen, wie gut Deutschland für die sich wandelnden Anforderungen gerüstet ist. Sowohl die Elektromobilität als auch die Digitalisierung werden dabei wichtige Komponenten sein. Gesellschaftlich unerwünschte Effekte bei der heimischen Wertschöpfung und Beschäftigung, die noch schwer zu beziffern sind, lassen sich abmildern, wenn Politik und Wirtschaft zu Gestaltern des Strukturwandels werden. Unnötiges Abwarten beeinträchtigt nicht nur die Luftqualität, sondern gefährdet auch den Verlust von Marktanteilen und Arbeitsplätzen.

Deutschland kann zum Vorreiter und Leitanbieter nachhaltiger Mobilitätskonzepte werden. Dafür muss ein umfassender Plan erarbeitet werden. Werden die Weichen richtiggestellt, dann ist nicht nur gesunde Luft für alle erreichbar, auch der Klimaschutz kommt voran und der Weg ist offen für eine umwelt- und wirtschaftsverträgliche Entwicklung.

Literatur

- Adler MW, Ommeren JNV (2016) Does public transit reduce car travel externalities? Quasi-natural experiments evidence from transit strikes. *J. Urban Econ.* 92: 106-119.
- Anas A, Lindsey R (2011) Reducing Urban Road Transportation Externalities: Road Pricing in Theory and in Practice. *REEP* 5: 66-88.
- Bäumer M, Hautzinger H, Pfeiffer M, et al. (2017). Fahrleistungserhebung 2014. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach.
- Bauernschuster S, Hener T, Rainer H (2017) When Labor Disputes Bring Cities to a Standstill: The Impact of Public Transit Strikes on Traffic, Accidents, Air Pollution, and Health. *Am. Econ. J.: Econ. Pol.* 9: 1-37.
- Beaudoin J, Lin Lawell C (2016) Is public transit's green reputation deserved? Evaluating the effects of transit supply on air quality. Working Paper, University of California at Davis, 1-40.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018): Verkehr in Zahlen 2017/2018. Hamburg.
- Chen Y, Whalley A (2012) Green Infrastructure: The Effects of Urban Rail Transit on Air Quality. *Am. Econ. J.: Econ. Pol.* 4: 58-97.
- Cox B, Bauer C, Mutel C (2019) Current and future environmental performance of passenger cars. Paul-Scherer Institut Policy Brief.
- DeShazo J, Sheldon TL, Carson RT (2017) Designing policy incentives for cleaner technologies: Lessons from California's plug-in electric vehicle rebate program. *J. Environ. Econ. Manage.* 84: 18-43.
- D'Haultfoeuille X, Givord P, Boutin X (2014) The environmental effect of green taxation: the case of the french bonus/malus. *Econ. J.* 124(578), F444-F480.
- European Commission (2017). Impact Assessment accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council setting emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles as part of the Union's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles and amending Regulation (EC) No 715/2007. SWD(2017) 650 final.
- Frieske, B, van den Adel B, Schwarz-Kocher M, et al. (2019) Strukturstudie BWe mobil 2019 – Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung. (Hrsg.) e-mobil BW GmbH, Stuttgart.
- Frondel M, Vance C (2017) Drivers response to fuel taxes and efficiency standards: evidence from Germany. *Transportation* 45: 989-1001.
- Gallagher KS, Muehlegger E (2011) Giving Green to Get Green: Incentives and Consumer Adoption of Hybrid Vehicle Technology. *J. Environ. Econ. Manage.* 61: 1-15.
- Gerlagh R, Bijgaart IVD, Nijland H, Michielsen T (2018) Fiscal Policy and CO₂ Emissions of New Passenger Cars in the EU. *Environ. Resour. Econ.* 69: 103-134.
- Gendron-Carrier N, Gonzalez-Navarro M, Polloni S, Turner M (2018) Subways and Urban Air Pollution. National Bureau of Economic Research, Bd. 24183.
- Gillingham K, Munk-Nielsen A (2019) A tale of two tails: commuting and the fuel price response in Driving. *J. Urban Econ.* 109: 27-40.
- Grigolon L, Reynaert M, Verboven F (2018) Consumer Valuation of Fuel Costs and the Effectiveness of Tax Policy: Evidence from the European Car Market. *Am. Econ. J.: Econ. Pol.* 10: 193-225.
- Gonzalez-Navarro M, Turner M (2018) Subways and Urban Growth: Evidence from Earth. *J. Urban Econ.* 108: 85-106.
- Huse C, Lucinda C (2014) The Market Impact and the Cost of Environmental Policy: Evidence from the Swedish Green Car Rebate. *Econ. J.* 124: 393-419.
- Invernizzi G, Ruprecht A, Mazza R, et al. (2011) Measurement of black carbon concentration as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in Milan, Italy. *Atmospheric Environ.* 21: 3522-3527.
- ITP/BVU (2014) Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn.
- KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2018) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken, 1. Januar 2018 (FZ 1). URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html [Stand: 05.04.2019]
- Klier T, Linn J (2015) Using Taxes to Reduce Carbon Dioxide Emissions Rates of New Passenger Vehicles: Evidence from France, Germany, and Sweden. *Am. Econ. J.: Econ. Pol.* 7: 212-242.
- Koch N, Klauber H, Rohlf A, Ritter N (2018) Politik-Ansätze für einen umweltfreundlichen Straßenverkehr. PIK-Arbeitspapier.
- Kroher T (2019) Wie gut funktioniert Hardware-Nachrüstung? Drei SCR-Systeme im Dauertest. ADAC Online, URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/abgas-diesel-fahrverbote/dieselkauf-abgasnorm/hardware-nachrustungen/> [Stand: 05.04.2019]

- Lalive R, Luechinger S, Schmutzler A (2018) Does expanding regional train service reduce air pollution? *J. Environ. Econ. Manage.* 92: 744-764.
- Leape J (2006) The London Congestion Charge. *J. Econ. Perspec.* 20: 157-176.
- Mocanu T, Winkler C, Kuhnimhof T (2018) The travel demand impact of fare-free regional public transport in Germany. *Internationales Verkehrswesen* 1: 38-42.
- Mulalic I, Pilegaard N, Rouwendal J (2015) Does Improving Public Transport Decrease Car Ownership? Evidence from the Copenhagen Metropolitan Area. Tinbergen Institute Discussion Paper.
- Parry IW (2002) Comparing the efficiency of alternative policies for reducing traffic congestion. *J. Public Econ.* 85: 333-362.
- Rivers N, Saberian S, Schaufele B (2017) Public Transit and Air Pollution. Working Paper, 1-40.
- Simeonova E, Currie J, Nilsson P, Walker R (2018) Congestion Pricing, Air Pollution and Children's Health. National Bureau of Economic Research, Bd. w24410.
- Van Benthem A (2015) What is the optimal speed limit on freeways? *J. Public Econ.* 124: 44-62.
- Wolff H (2014) Keep Your Clunker in the Suburb: Low-emission Zones and Adoption of Green Vehicles. *Econ. J.* 124: F481-F512.
- Zimmer A, Koch N (2017) Fuel consumption dynamics in Europe: Tax reform implications for air pollution and carbon emissions. *Transp. Res. Part A Policy Prac.* 106: 22-50.

Anhang

Diese Ad-hoc-Stellungnahme berücksichtigt und würdigt den aktuellen Stand der Forschung unter Beachtung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis. Die Entstehung der Stellungnahme wurde ausschließlich aus Mitteln der Leopoldina finanziert, die ihr als Nationaler Akademie der Wissenschaften in Form der institutionellen Grundfinanzierung durch den Bund und das Land Sachsen-Anhalt zufließen. Die Mitglieder der Arbeitsgruppe, die ehrenamtlich an der Stellungnahme mitgewirkt haben, wurden verpflichtet, Sachverhalte zu benennen, die geeignet sind, potentiell zu Interessenskonflikten oder zur Besorgnis der Befangenheit zu führen.

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Achim Dittler	Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Hans Drexler	Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Ottmar Edenhofer ML	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Prof. Dr. Jörg Hacker ML	Präsident der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle (Saale)/Berlin (Steuerkreis)
Prof. Dr. Manfred Hennecke	ehem. Präsident der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
Prof. Dr. Barbara Hoffmann	Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (Kapitel Gesundheitseffekte)
Prof. Dr. Göran Kauermann	Institut für Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus ML	Fakultät für Chemie, Universität Bielefeld
Prof. Dr. Jean Krutmann ML	IUF – Leibniz-Institut für Umweltmedizinische Forschung, Düsseldorf
Prof. Dr. Johannes Lelieveld ML	Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz
Prof. Dr. Barbara Lenz	Institut für Verkehrsforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin
Prof. Dr. Wolfgang Löwer	Institut für Öffentliches Recht, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Prof. Dr. Martin Lohse ML	Vize-Präsident der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina; Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in der Helmholtz-Gemeinschaft (MDC), Berlin (Leitung Steuerkreis)
Prof. Dr. Jörg Michaelis	Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Prof. Dr. Ulrich Pöschl	Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz
Prof. Dr. Ortwin Renn ML	Institut für Transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS), Potsdam
Prof. Dr. Norbert Suttrop ML	Medizinische Klinik mit Schwerpunkt Infektiologie und Pneumologie, Charité Universitätsmedizin, Berlin
Prof. Dr. Erika von Mutius ML	Institut für Asthma und Allergieprävention (IAP), Helmholtz-Zentrum München
Prof. Dr. Sigmar Wittig ML	Sekretar der Klasse I; Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Steuerkreis)
Prof. Dr. Jürgen Wolfrum	Physikalisch-Chemisches Institut, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

ML = Mitglied der Leopoldina

Die Arbeitsgruppe konstituierte sich auf einer Sitzung am 21. Februar 2019 in Berlin.

Am 1. März 2019 richtete die Arbeitsgruppe in Berlin eine Anhörung zur Thematik aus, an der die folgenden nationalen und internationalen Expertinnen und Experten teilgenommen haben:

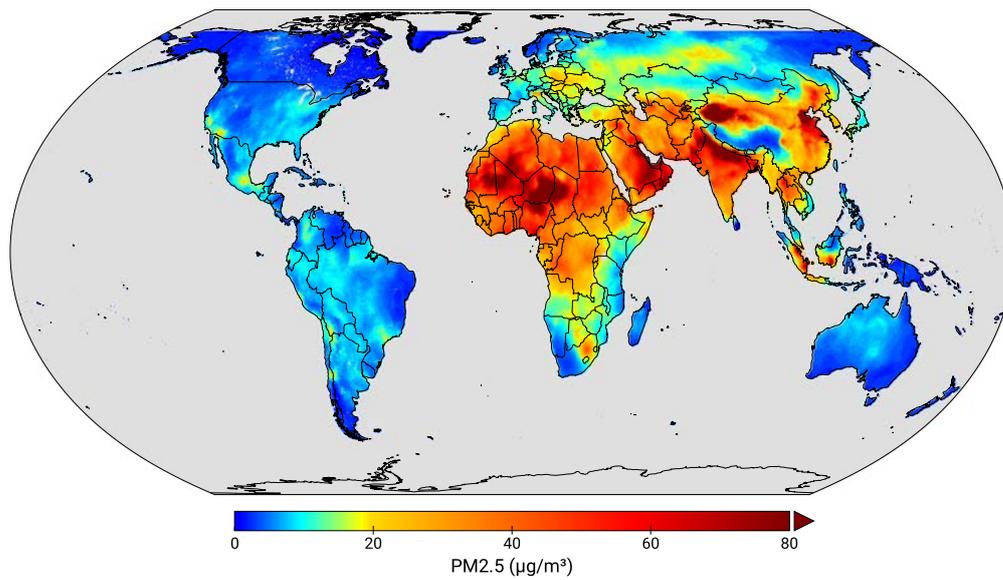
Angehörte Expertinnen und Experten

Prof. Dr. Michael Bargende	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK), Universität Stuttgart
Prof. Michael Brauer, ScD	School of Population and Public Health, Faculty of Medicine, The University of British Columbia, Vancouver
Prof. Dr. ir. Bert Brunekreef	Institute for Risk Assessment Sciences, University Medical Center Utrecht, Universiteit Utrecht & Julius Center for Health Sciences and Primary Care
Prof. Dr. Olaf Deutschmann	Institut für Technische Chemie und Polymerchemie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Roy M. Harrison, PhD	School of Geography, Earth & Environmental Sciences, University of Birmingham
Dr. Michal Krzyzanowski	Science Policy – Environmental Research Group, King’s College London
Prof. Dr. Helmut Küchenhoff	Institut für Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. med. Nino Künzli, PhD	Vize-Direktor Schweizerisches Tropen- und Public Health Institut (SwissTPH); Dean Swiss School of Public Health (SSPH+); Ordina- rius für Prävention und Gesundheit, Universität Basel; Präsident Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)
Dr. Ian Mudway	Analytical & Environmental Sciences Division, King’s College London
Prof. Dr. Annette Peters	Institut für Epidemiologie, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Helmholtz-Zentrum München
Prof. Dr. Thomas Weber	Vize-Präsident, acatech – Deutsche Akademie der Technikwis- senschaften; Mitglied des Lenkungskreises Nationale Plattform Elektromobilität

Zudem bat die Arbeitsgruppe die folgenden Personen um schriftliche Statements zu einzelnen Aspekten der Thematik:

Verfasser schriftlicher Statements

Prof. Dr. med. Dieter Köhler	ehem. ärztlicher Direktor Krankenhaus Kloster Grafschaft
Prof. Dr. Walter Krämer	Fakultät für Statistik, Technische Universität Dortmund
PD Dr. Peter Morfeld	Fakultät für Mathematik, Ruhr-Universität Bochum; Institut und Poliklinik für Arbeitsmedizin, Umweltmedizin und Präventionsforschung der Universität zu Köln
Dr.-Ing. Christine Schneider	AVISO GmbH, Aachen



Weltkarte der Feinstaubbelastung: Die Karte basiert auf Satellitenbeobachtungen und zeigt die mittlere Belastung unterschiedlicher Erdteile mit Feinstaub der Größenklasse PM_{2,5} im Jahr 2016. Mit Durchmessern bis etwa 2,5 Millionstel Meter sind diese Partikel mit bloßem Auge nicht erkennbar.

Die **Weltkarte** stellt die Gesamtbelastung mit PM_{2,5}-Feinstaub dar, unabhängig davon, ob er aus natürlichen Quellen stammte oder durch menschliche Aktivitäten (Kraftwerke, Industrie, Landwirtschaft, Verkehr, Heizung, etc.) verursacht wurde. Die Farbskala umfasst Konzentrationen bis 80 Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Atemluft. Zur Einordnung: Der EU-Grenzwert für die mittlere Jahresbelastung liegt bei 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Auf dem **Titelbild** dieser Stellungnahme ist ein Ausschnitt der Weltkarte zu sehen: Er vermittelt einen Eindruck von der PM_{2,5}-Gesamtbelastung in Europa.

Abbildungen: Klaus Klingmüller, MPIC Mainz, abgeleitet aus Satellitenbeobachtungen (Van Donkelaar et al., 2016).

Notizen

Ausgewählte Publikationen der Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

Stellungnahmen

- 2019 | Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik

- 2018 | Governance für die Europäische Energieunion
Privatheit in Zeiten der Digitalisierung
Artenrückgang in der Agrarlandschaft
Künstliche Photosynthese

- 2017 | Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende
Promotion im Umbruch
Social Media und digitale Wissenschaftskommunikation. Analyse und Empfehlungen zum Umgang mit Chancen und Risiken in der Demokratie
Das Energiesystem resilient gestalten. Maßnahmen für eine gesicherte Versorgung
Verbraucherpolitik für die Energiewende
Rohstoffe für die Energiewende. Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung

- 2016 | Additive Fertigung
Wissenschaftliche und gesellschaftspolitische Bedeutung bevölkerungsweiter Längsschnittstudien

- 2015 | Staatsschulden: Ursachen, Wirkungen und Grenzen
Mit Energieszenarien gut beraten – Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung
Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050
Zur Gesundheitsversorgung von Asylsuchenden
Chancen und Grenzen des genome editing
Medizinische Versorgung im Alter – Welche Evidenz brauchen wir?
Public Health in Deutschland: Strukturen, Entwicklungen und globale Herausforderungen
Perspektiven der Quantentechnologien
Akademien nehmen Stellung zu Fortschritten der molekularen Züchtung und zum erwogenen nationalen Anbauverbot gentechnisch veränderter Pflanzen

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: (0345) 472 39-600
Fax: (0345) 472 39-919
E-Mail: leopoldina@leopoldina.org

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina unterstützt Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Expertinnen und Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung
ISBN: 978-3-8047-4012-9