

Gesundheitsrisiken im urbanen Raum

Annette Peters

Zusammenfassung

Die Gesundheit der Bevölkerung im urbanen Raum wird von Umweltfaktoren, aber auch dem sozioökonomischen Kontext beeinflusst. Luftschadstoffe, Lärm und Hitze haben negative Auswirkungen auf die Gesundheit, während Grünflächen und städtische Infrastrukturen die Gesundheit der Bevölkerung verbessern. Die Luftschadstoffe Feinstaub und Stickstoffdioxid sind für die größte Krankheitslast im urbanen Raum verantwortlich. Daher wird die Novellierung der Grenzwerte für diese Schadstoffe auf europäischer Ebene eine deutliche Verbesserung der Lebensbedingungen in den Städten bewirken. In Zeiten des Klimawandels erhält die Rolle der Umwelt eine immer größere Bedeutung. Dabei ist für die Gesundheit die Hitze das wichtigste Thema in Deutschland. Hitze belastet insbesondere das Herz-Kreislauf-System und kann beispielsweise Herzinfarkte auslösen. Große, prospektive Kohortenstudien, wie die NAKO Gesundheitsstudie, können hier einen entscheidenden Beitrag zum Verständnis der gegenwärtigen und zukünftigen Auswirkungen auf die Gesundheit leisten. Für zukünftige Betrachtungen und zur Anpassung an die sich ändernden Bedingungen ist es entscheidend, das Zusammenspiel der Umweltfaktoren und die Rolle des sozioökonomischen Kontextes besser zu verstehen.

Summary

Health impacts in urban areas

Environmental factors as well as the socio-economic context influence the health of the population in urban areas. Air pollutants, noise, and heat have negative effects on health, while green spaces and urban infrastructures improve the health of the population. Among the environmental factors in urban areas, air pollutants present the largest burden of disease. Therefore, the amendment of the ambient air quality guideline for fine particulate matter and nitrogen dioxide at the European level will result in significant improvements in living conditions in cities. In times of climate change, the role of the environment is becoming increasingly important. The issue of heat is currently of major concern and affects health in Germany. Heat impacts the cardiovascular system and can trigger heart attacks, for example. Large, prospective cohort studies, such as the German National Cohort (NAKO), will make important contributions in the future. It will be crucial for the health of populations to better understand the interplay of environmental factors and the role of socio-economic factors in urban areas.

Der Beitrag basiert auf einem von der Autorin überarbeiteten Transkript ihres Vortrags vom 9. April 2024 in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

✉ Prof. Dr. Annette Peters, LMU München und Helmholtz Munich, Institut für Epidemiologie, Ingolstädter Landstraße 1, 85764 Neuherberg; annette.peters@helmholtz-munich.de

Einführung

Bereits jetzt leben 75 % der Menschen in Europa in Städten. Die Gesundheit im urbanen Raum wird immer wichtiger und wir verstehen zunehmend besser, wie Umweltfaktoren auf sie wirken. Dazu kommt, dass sich durch den Klimawandel die Interaktionen von Faktoren wie Luftverschmutzung, Lärm, Temperatur und Grünanteil mit unserem Lebensstil, unserem Verhalten und sozioökonomischen Faktoren gerade rasant verändern (Abb. 1; Schneider et al. 2017). Die urbanen Faktoren Luftschadstoffe und Hitze liegen im Hinblick auf die weltweite Krankheitslast an vorderster Stelle und sind unter den ersten zehn Risikofaktoren für Todesfälle (GBD 2020).

Um als Epidemiologen das Geschehen besser zu verstehen, kartieren wir die Umwelt für möglichst große Populationen, wobei uns weniger einzelne Personen interessieren als Bevölkerungsgruppen, z. B. die Bevölkerung in Städten. Wir erstellen dazu Karten für Luftschadstoffe ($PM_{2,5}$, NO_2 , O_3 , ultrafeine Partikel)¹, für Lärm, Temperatur und Luftfeuchte, für Grünflächen (Vegetationsindex NDVI aus Satellitendaten; Baumbedeckung), für die Dichte und Höhe von Gebäuden und für (Hauptverkehrs)straßen (Abstände zu den Gebäuden; Verkehrsaufkommen). Diese Daten verschneiden wir mit sozioökonomischen Faktoren wie Beschäftigungsquote, Einkommensstruktur, Größe und Anzahl der Haushalte, Beeinträchtigungen (Deprivation) und Urbanität.

Luftschadstoffe und Gesundheit

Weltweit sterben jährlich ca. 7 Millionen Menschen aufgrund von Luftschadstoffen. Die Luft, die wir atmen, ist ein komplexes Gemisch aus Gasen und Partikeln verschiedener Größe. 1 cm³ Luft enthält ca. 10 000 ultrafeine Partikel im städtischen Hintergrund; in einem Raum wie dem heutigen Vortragssaal sind geschätzt etwa 5000 Partikel/cm³ enthalten. Mit jedem Atemzug atmen wir dieses komplexe Gemisch ein, das miteinander weiterreagiert. Gerade die ultrafeinen Partikel, die aus Verbrennungs-

prozessen stammen, koagulieren, und weitere Schadstoffe lagern sich auf deren Oberfläche ab. Der Feinstaub dringt tief in die Lunge ein und gelangt bis zu den Atembläschen. Dort wird er vom Immunsystem erkannt und von Fresszellen aufgenommen und eliminiert. Ultrafeine Partikel können aber auch bis in den Blutkreislauf gelangen und Botenstoffe (Biomarker) freisetzen. Insgesamt entstehen so Lungenerkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und auch neurologische Erkrankungen, wie Schlaganfall oder Demenz. Vor diesem Hintergrund sind die hohe Belastung an Feinstaub, wie sie in den großen Städten Europas, aber z. B. auch in der Poebene vorkommt, sowie die Belastung an NO_2 , die in Städten besonders hoch ist (de Hoogh et al. 2018), als bedeutungsvoll für die Gesundheit einzustufen. Ozon (O_3) zeigt dagegen eine andere Verteilung, da es vor allem mit Hitze einhergeht. Es ist daher vor allem in Süd-, aber zunehmend auch in Mitteleuropa ein Risikofaktor.

Wir wissen inzwischen, dass die derzeitige Regulierung der Schadstoffe nicht ausreicht. Für Feinstaub $PM_{2,5}$, der tief in die Lunge eindringt und den wir für den gefährlichsten Schadstoff halten, wurden in den USA und weltweit lang- und kurzfristige Effekte auf die Gesundheit auch unterhalb der festgelegten Grenzwerte ermittelt (Di et al. 2017, Liu et al. 2019). Daher hat die WHO vor über zwei Jahren neue Richtlinien erlassen. Im Oktober 2024 wurden von der EU neue Grenzwerte verabschiedet (Tab. 1; Andersen et al. 2021, Europäischer Rat 2024), die nun in nationales Recht umzusetzen sind. Demnach sind bis 2030 in der EU Jahresmittelwerte von 10 $\mu g/m^3$ $PM_{2,5}$, von 20 $\mu g/m^3$ für PM_{10} und von 20 $\mu g/m^3$ für NO_2 einzuhalten. Diese Grenzwerte werden die menschliche Gesundheit in den Städten wirkungsvoller schützen als die bisher geltenden Grenzwerte der EU von 2008.

Hitze und menschliche Gesundheit

Bei der Beurteilung des Einflusses hoher Temperaturen auf die menschliche Gesundheit stützen wir uns auf Datenreihen der Messstationen des Deutschen Wetterdienstes (tägliche Minimal-, Durchschnitts- und Höchstwerte). Zusätzlich modellieren wir die räumliche und zeitliche Variation der Temperatur mithilfe von Fernerkundungsdaten zu Oberflächentemperatur, NDVI, Topografie und Landnutzung und können so

1 Feinstaub, $PM_{2,5}$: Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 μm . Ultrafeine Partikel (Ultrafeinstaub): Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 100 nm.

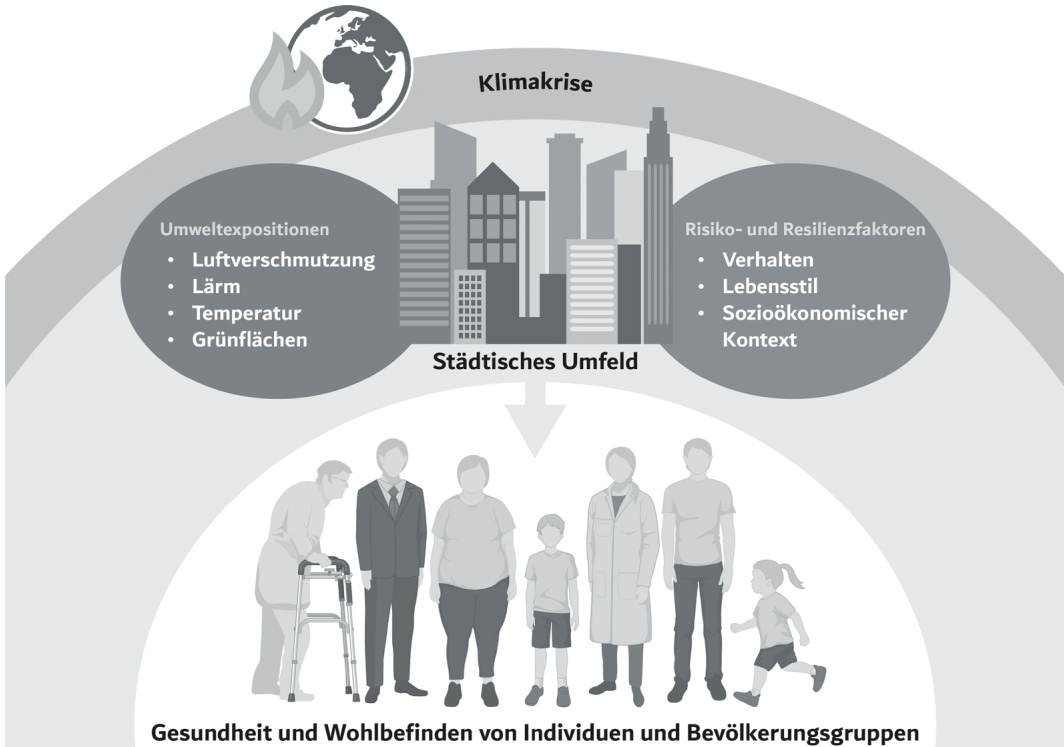


Abb. 1. Schematische Darstellung der Rolle der Umwelt auf Gesundheit und Wohlbefinden im urbanen Raum. – Nach Schneider et al. (2017), erstellt mit BioRender.com.

räumliche Vorhersagen treffen (Nikolaou et al. 2023). Als Parameter ergeben sich daraus z.B. die täglichen, jahreszeitlichen oder jährlichen Minimum-, Maximum- und Durchschnittstemperaturen, der tägliche Temperaturbereich, die Anzahl heißer und kalter Tage sowie die relative Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Anzahl der Sonnenstunden pro Tag und der Niederschlag. Die weltweite Studie »Multi-County Multi-City« (MCC)² konnte anhand entsprechender Modellrechnungen zeigen, dass

es für jede Stadt eine bestimmte Temperatur gibt, bei der das Minimum an Sterbefällen auftritt; in Berlin liegt sie z.B. bei knapp über 20 °C,

2 Multi-County Multi-City (MCC) Collaborative Research Network, mit den vier Hauptforschungsgebieten Umgebungstemperatur und Mortalität, Klimawandel und Gesundheit, Luftverschmutzung und Mortalität, Methodenentwicklung und Umweltepidemiologie; <https://mccstudy.lshtm.ac.uk/> [abgerufen 25.05.2024].

Tab. 1. Aktuelle Grenz- und vorgeschlagene Richtwerte (WHO 2005 und 2021) für Feinstaub (PM_{2,5}, PM₁₀) und NO₂. – Nach Andersen et al. (2021), Europäischer Rat (2024), EU (2024).

	EU-Grenzwerte 2008 (Ambient Air Quality Directive)		EU-Grenzwerte 2024 (Ambient Air Quality Directive)		WHO-Richtwerte 2021 (Air Quality Guideline)	
	Jährlich	Täglich (24 h)	Jährlich	Täglich (24 h)	Jährlich	Täglich (24 h)
PM _{2,5}	25 µg/m ³	–	10 µg/m ³	25 µg/m ³	5 µg/m ³	15 µg/m ³
PM ₁₀	40 µg/m ³	50 µg/m ³	20 µg/m ³	45 µg/m ³	15 µg/m ³	45 µg/m ³
NO ₂	40 µg/m ³	50 µg/m ³	20 µg/m ³	50 µg/m ³	10 µg/m ³	25 µg/m ³

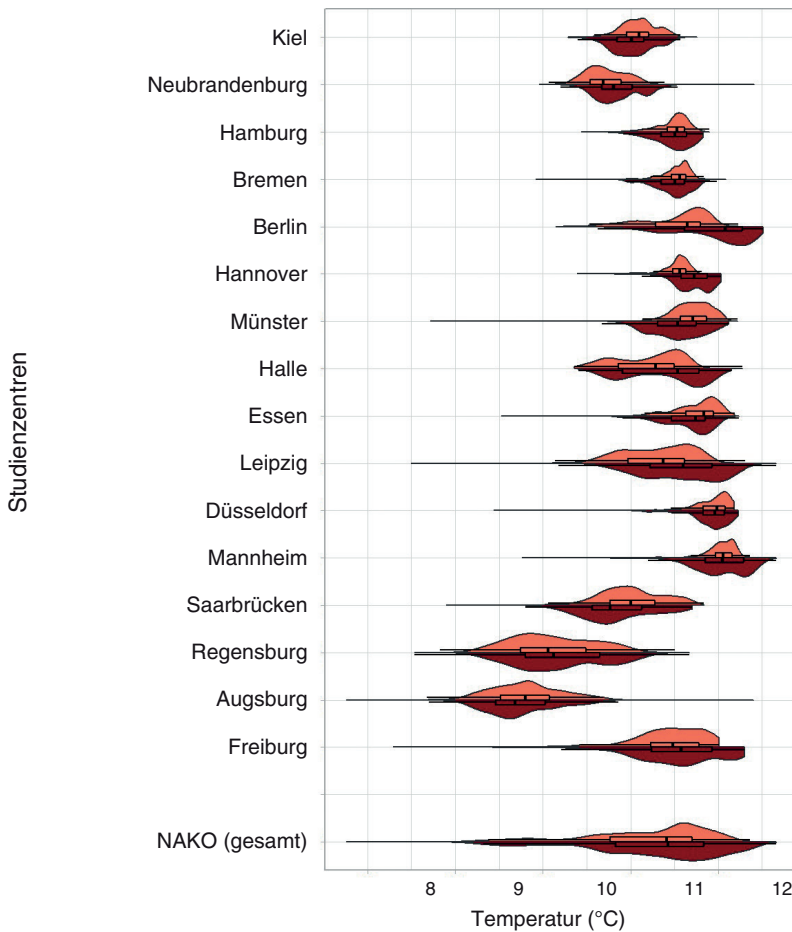


Abb. 2. Jahresdurchschnittswerte der Temperatur (Boxplots mit Medianwerten, 25ster und 75ster Perzentile, Flächen: Häufigkeitsverteilungen) an den Wohnorten der NAKO Studienteilnehmenden entsprechend der Studienregionen der NAKO Gesundheitsstudie in den Jahren 2014 (■) und 2019 (■). – Bisher unveröffentlichte Daten.

in Zürich bei knapp über 15 °C und in Athen bei etwa 25 °C (Mistry et al. 2022). Bei einer höheren oder tieferen Temperatur sterben jeweils mehr Menschen, wobei die Risikorate für die Mortalität bei höheren Temperaturen jeweils relativ rasch steil ansteigt. Dieses Muster ist weltweit zu sehen und trifft auch für die Städte in Deutschland zu, d. h., steigende Temperaturen führen auch bei uns zu einer höheren Mortalitätsrate.

Die Anzahl und räumliche Verteilung der Hitzetage in Deutschland im Zeitraum 2001–2020 ist von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich (Nikolaou et al. 2023), allerdings mit klar steigender Tendenz. Wendet man diese modellierten Daten auf die

Teilnehmenden der NAKO Gesundheitsstudie³ (Peters et al. 2022) an, so zeigt sich 2019 im Vergleich zu 2014, als wir mit der Studie begonnen haben, insgesamt ein Anstieg der durchschnittli-

3 NAKO Gesundheitsstudie (Beginn: 2014, Dauer: 20–30 Jahre, ca. 200 000 Männer und Frauen im Alter von 20–69 Jahren): Bundesweite Kohortenstudie (NAKO: Nationale Kohorte) mit dem Ziel, die Entstehung von Krankheiten wie Krebs, Diabetes, Herzinfarkt u. a. besser zu verstehen, um Vorbeugung, Früherkennung und Behandlung in Deutschland zu verbessern; <https://nako.de/> [abgerufen 25.05.2024].

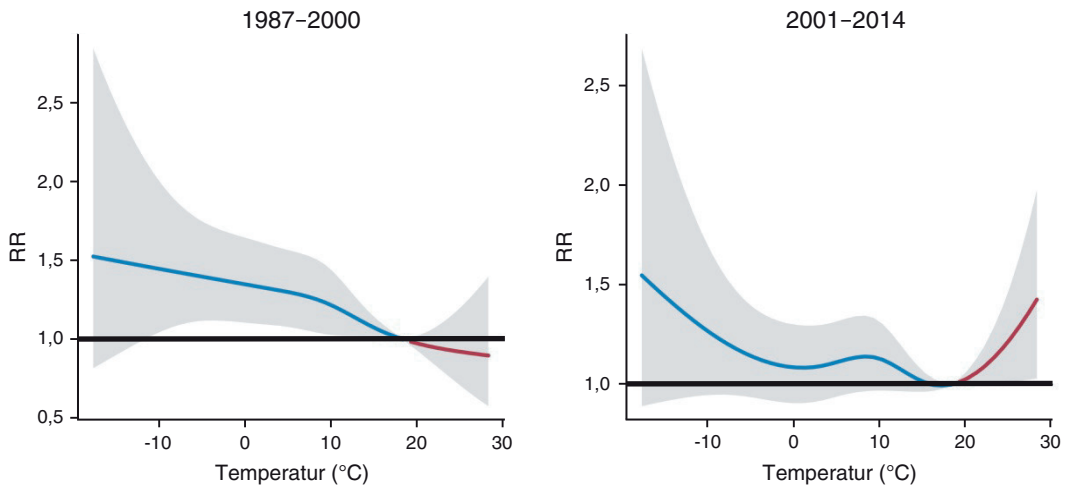


Abb. 3. Für die Zeiträume 1987–2000 und 2001–2014 vorhergesagtes relatives Risiko (RR) für Herzinfarkt (graue Flächen: 95-Prozent-Intervall) in Abhängigkeit von der Temperatur gemäß den Daten aus der KORA-Studienregion Augsburg. RR = 1,0 entspricht der Temperatur ohne Veränderung des Herzinfarktrisikos. – Nach Daten aus Chen et al. (2019).

chen Jahrestemperatur und ihrer Variabilität an den Wohnorten der teilnehmenden Personen in den 16 Studienregionen. Besonders stark ist der Temperaturanstieg dabei in den Studienzentren Berlin, Hannover und Leipzig ausgeprägt (Abb. 2, noch nicht veröff.). Künftig wollen wir diese Daten nutzen, um die Gesundheit in Deutschland und ihre Veränderung abzubilden.

In der KORA-Studienregion Augsburg⁴ zeigen sich schon jetzt Veränderungen im Auftreten von Herzinfarkten in Abhängigkeit von der Temperatur (Abb. 3; Chen et al. 2019). Während vor der Jahrhundertwende vor allem die negativen Effekte der Kälte maßgeblich waren, sehen wir jetzt auch einen Anstieg des Herzinfarktrisikos bei Hitzetagen. Besonders betroffen waren dabei Studienteilnehmer und -teilnehmerinnen mit Diabetes und Hyperlipidämie, d. h. mit ungünstigen Fettwerten. Diese und andere Studien haben

dazu beigetragen, dass heute die Auswirkungen der Hitze auf das Herz-Kreislauf-System immer besser verstanden werden (Lechner et al 2024).

Schutz der menschlichen Gesundheit durch Grünflächen

Grünflächen in den Städten lassen sich über verschiedene Fernerkundungsdaten kartieren, wie den Vegetationsindex NDVI, den Grünflächenanteil in Pufferzonen, die Landbedeckung/Landnutzung, den Abstand zur nächsten Grünfläche und die Baumkronenbedeckung. Dazu kommen subjektive Parameter wie eigene Angaben zur Grünflächensituation, zur Sicht von Grünflächen beim Blick aus dem Fenster oder zu Freizeitaktivitäten in der Natur. Diese Daten haben wir in der ELAPSE-Studie⁵ mit großen Kohortendaten verschnitten. Neben acht ausgewählten gut charakterisierten Erwachsenen-Kohorten in Europa, darunter die KORA-Studie in Augsburg, wurden sieben große administrative Kohorten ausgewertet. Hier ist Deutschland nicht vertreten, da wir keine Kohorte aus Daten der

4 KORA, Kooperative Gesundheitsforschung in der Region Augsburg (1984–2001, fortlaufende Follow-up-Studien, ca. 17 600 Teilnehmende); Erforschung von Krankheitsursachen und deren biomedizinischen Grundlagen mit dem Ziel, den Zusammenhang von Verhalten, Genen und Umweltfaktoren auf die Gesundheit besser zu verstehen; <https://www.helmholtz-munich.de/en/epi/cohort/kora> [abgerufen 25.05.2024].

5 ELAPSE, Effects of Low-Level Air Pollution: a Study in Europe (2016–2021); <https://www.helmholtz-munich.de/en/epi/projects/elapse> [abgerufen 25.05.24]

gesamten Population zusammenstellen können. Die dafür benötigten Daten werden nicht zentral gesammelt und vorhandene Teildatensätze dürfen bisher nicht verbunden werden. Durch solche Verknüpfungen lassen sich Mortalität, Lungenkrebsinzidenz, das Auftreten von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Asthma und COPD mit den Daten zum Umgebungsgrün (NDVI, gemessen in einem 300-m-Netz sowie einem 1-km-Gürtel um den Wohnbereich) und zu Luftschadstoffen ($\text{PM}_{2,5}$, NO_2 , Ruß, wärmebedingtes O_3) in Verbindung setzen (Bereziartua et al. 2022). Der NDVI lag dabei im Durchschnitt bei $0,33 (\pm 0,1)$ in dem 300-m-Netz und bei $0,34 (\pm 0,1)$ in dem 1-km-Bereich. Das Grün hatte einen klaren protektiven Effekt in Bezug auf die Mortalität für natürliche Todesfälle (47 179 Fälle in den follow-up-Studien bei 327 388 Studienteilnehmern). Pro Anstieg des NDVI um 0,1 (bei einem Gesamtbereich von 0 bis 1) ergab sich eine um 5% verminderte Mortalitätsrate. Auch mit der spezifisch durch Diabetes (1042 Todesfälle), Atemwegserkrankungen (2885 Todesfälle) und Lungenkrebs (3813 Todesfälle) verursachten Mortalitätsrate war der NDVI invers assoziiert. Dieser positive Effekt von Grünflächen ist auch nach der Adjustierung der Daten für Luftschadstoffe vorhanden (Bereziartua et al. 2022).

Gemeinsame Wirkung von Umweltfaktoren in Städten

In der KORA-Studie haben wir festgestellt, dass nicht alle Personen gleich reagieren. Bei Personen mit Adipositas ist z.B. das Risiko, eine distal-sensomotorische Polyneuropathie (DSPN) zu entwickeln, die einen Großteil aller diabetischen Neuropathien ausmacht, stärker mit dem Fehlen von Grün, mit nächtlichem Verkehrslärm und mit Luftschadstoffen (v.a. ultrafeine Partikel) assoziiert als bei nicht-adipösen Personen (Herder et al. 2023). Werden die Effekte von Grünflächen, ultrafeinen Partikeln, Verkehrslärm und Temperaturen in der warmen Jahreszeit miteinander kombiniert, ergibt sich bei adipösen Personen eine Verdoppelung des DSPN-Risikos. Bei nicht-adipösen Personen unterscheidet sich das DSPN-Risiko der kombinierten Faktoren nicht von dem der Einzelfaktoren.

Um künftig das Zusammenwirken schädlicher Umweltfaktoren besser einordnen zu können, untersuchen wir typische Ausprägungen und

molekulare Signaturen umweltbedingter Schädigungen. Dazu gehören oxidativer Stress und Entzündungen auf zellulärer Ebene, genomische Veränderungen und Mutationen, epigenetische Veränderungen, mitochondriale Dysfunktion, endokrine Störungen, eine veränderte interzelluläre Kommunikation, veränderte Mikrobiomgemeinschaften und eine Beeinträchtigung der Nervensystemfunktionen (Peters et al. 2021). Auf diese Weise wollen wir den Zusammenhang zwischen komplexen Umweltbelastungen und chronischen Krankheiten wie Krebs, Atemwegs-, Herz-Kreislauf- und Stoffwechselerkrankungen verstehen.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Umweltfaktoren im urbanen Raum eine große Bedeutung haben. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftverschmutzung, Hitze und Lärm und die protektiven Effekte von Grünflächen sind gut belegt. Künftig wollen wir verstärkt das molekulare Verständnis von Krankheiten nutzen, um umweltbedingte Krankheiten besser zu verstehen bzw. die menschliche Gesundheit zu verbessern.

Für die Zukunft ist es sehr wichtig, dass die Luft in den Städten sauberer, die Städte grüner und leiser werden und sich nicht weiter im Sommer aufheizen. Vielfältige Maßnahmen im urbanen Raum sind notwendig, um die für den weiteren Klimawandel prognostizierten Krankheits- und Todesfälle verhindern zu können.

Danksagung

Mein Dank gilt Dr. Susanne Göttlicher, Dr. Alexandra Schneider und Dr. Kathrin Wolf vom Helmholtz Munich für die Erstellung und Anmerkungen zu den Grafiken.

Literatur

- Andersen, Z. J., U. Gehring, S. De Matteis, E. Melen, A. M. Vicedo-Cabrera, A. Yorgancioglu, C. Suppli Ulrik, S. Medina, K. Hansen, P. Powell, B. Ward & B. Hoffmann. 2021. Clean air for healthy lungs – an urgent call to action: European Respiratory Society position on the launch of the WHO 2021 Air Quality Guidelines. – *European Respiratory Journal*, 58: 2102447. DOI: [10.1183/13993003.02447-2021](https://doi.org/10.1183/13993003.02447-2021)
- Bereziartua, A., J. Chen, K. de Hoogh, S. Rodopoulou, Z. J. Andersen, ... & G. Hoek. 2022. Exposure to surrounding greenness and natural-cause and cause-specific mortality in the ELAPSE pooled

- cohort. – *Environment International*, 166: 107341. DOI: [10.1016/j.envint.2022.107341](https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107341)
- Chen, K., S. Breitner, K. Wolf, R. Hampel, C. Meisinger, M. Heier, W. von Scheidt, B. Kuch, A. Peters, A. Schneider & KORA Study Group. 2019. Temporal variations in the triggering of myocardial infarction by air temperature in Augsburg, Germany, 1987–2014. – *European Heart Journal*, 40: 1600–1608. DOI: [10.1093/eurheartj/ehz116](https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz116)
- de Hoogh, K., J. Chen, J. Gulliver, B. Hoffmann, O. Hertel, ... & G. Hoek. 2018. Spatial PM_{2.5}, NO₂, O₃ and BC models for Western Europe. – Evaluation of spatiotemporal stability. – *Environment International*, 120: 81–92. DOI: [10.1016/j.envint.2018.07.036](https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.036)
- Di, Q., Y. Wang, A. Zanobetti, Y. Wang, P. Koutrakis, C. Choirat, F. Dominici & J. D. Schwartz. 2017. Air pollution and mortality in the Medicare population. – *The New England Journal of Medicine*, 376: 2513–2522. DOI: [10.1056/NEJMoa1702747](https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747)
- Europäischer Rat. 2024. Luftqualität: Rat gibt endgültig grünes Licht für strengere Normen in der EU. – Rat der Europäischen Union, Pressemitteilung vom 14.10.2024. www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2024/10/14/air-quality-council-gives-final-green-light-to-strengthen-standards-in-the-eu [abgerufen 06.11.2024]
- EU. 2024. Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa (Neufassung). – Brüssel, 02.10.2024. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-88-2024-INIT/de/pdf> [abgerufen 06.11.2024]
- GBD 2019 Risk Factors Collaborators. 2020. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. – *Lancet*, 396: 1223–1249. DOI: [10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- Herder, C., S. Zhang, K. Wolf, H. Maalmi, G. J. Bönhof, W. Rathmann, L. Schwettmann, B. Thorand, M. Roden, A. Schneider, D. Ziegler & A. Peters. 2023. Environmental risk factors of incident distal sensorimotor polyneuropathy: Results from the prospective population-based KORA F4/FF4 study. – *The Science of the Total Environment*, 858 (Pt 3): 159878. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.159878](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159878)
- Lechner, K., S. Breitner-Busch, F. Matthies-Wiesler & A. Schneider. 2024. Hitze und kardiovaskuläres Risiko. – *Die Kardiologie* 18 (2): 120–126.
- Liu, C., R. Chen, F. Sera, A. M. Vicedo-Cabrera, Y. Guo, ... & H. Kan. 2019. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. – *The New England Journal of Medicine*, 381: 705–715. DOI: [10.1056/NEJMoa1817364](https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364)
- Mistry, M. N., R. Schneider, P. Masselot, D. Royé, B. Armstrong, ... & A. Gasparrini. 2022. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality. – *Scientific Reports*, 12: 5178. DOI: [10.1038/s41598-022-09049-4](https://doi.org/10.1038/s41598-022-09049-4)
- Nikolaou, N., M. Dallavalle, M. Stafoggia, L. M. Bouwer, A. Peters, K. Chen, K. Wolf & A. Schneider. 2023. High-resolution spatiotemporal modeling of daily near-surface air temperature in Germany over the period 2000–2020. – *Environmental Research*, 219: 115062. DOI: [10.1016/j.envres.2022.115062](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115062)
- Peters, A., T. S. Nawrot & A. A. Baccarelli. 2021. Hallmarks of environmental insults. – *Cell*, 184: 1455–1468. DOI: [10.1016/j.cell.2021.01.043](https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.043)
- Peters, A., German National Cohort (NAKO) Consortium, A. Peters, K. H. Greiser, S. Göttlicher, W. Ahrens, ... & J. Zschocke. 2022. Framework and baseline examination of the German National Cohort (NAKO). – *European Journal of Epidemiology*, 37: 1107–1124. DOI: [10.1007/s10654-022-00890-5](https://doi.org/10.1007/s10654-022-00890-5)
- Schneider, A., R. Rückerl, S. Breitner, K. Wolf & A. Peters. 2017. Thermal control, weather, and aging. – *Current Environmental Health Reports*, 4: 21–29. DOI: [10.1007/s40572-017-0129-0](https://doi.org/10.1007/s40572-017-0129-0)

Diskussion

P. Gerhard: Sie haben Grünflächen, Luftschadstoffe und Lärm als wichtige Faktoren für die Gesundheit genannt. Haben Sie auch Informationen, wie sich die Exposition gegenüber künstlichem Licht auf die menschliche Gesundheit auswirkt?

A. Peters: Das ist ein wichtiges Thema, dessen Untersuchung aber erst am Anfang steht. Die Hypothese ist, dass künstliches Licht den zirkadianen Rhythmus stört und wir in den Städten ein Zuviel an Lichtverschmutzung haben. Wir führen gerade ein großes EU-Projekt durch, in dem künstliches Licht als Einflussfaktor berücksichtigt wird.⁶ Man braucht dazu allerdings sehr gute und präzise Schätzungen von Licht, idealerweise mit einer Auflösung von 30 Meter. Bei einer gröberen Schätzung bildet die Lichtexposition mehr oder minder nur die Gebäudestruktur ab, d. h. die Versiegelung des Bodens. In den von mir gezeigten Studien schätzen wir die Exposition am Wohnort nur relativ grob und daher stellt sich immer die Frage nach der individuellen Belastung. Bei den Luftschadstoffen wissen wir, dass sie auch im Innenraum präsent sind; bei dem Lärm wissen wir, dass er auch durch die Fenster dringt, und die Grünflächen können wir sehen. Beim Licht kommen aber noch andere Lichtquellen dazu, zum Beispiel die Nutzung von Mobilgeräten in der Nacht. Wir müssen uns dabei sowohl die persönlichen Faktoren, die vom Verhalten herkommen, als auch die externen Faktoren, die aus der Umwelt kommen, sehr genau ansehen.

M. Schlöter: Ist in den Studien Grün gleich Grün? Das heißt, spielt es bei dem gezeigten positiven Effekt von Grünflächen eine Rolle, ob es sich um eine Monokultur von *Dactylis glomerata* oder einem anderen Gras handelt oder um ein hoch diverses Ökosystem? Bzw. lässt sich aus den Satellitendaten ableiten, ob es sich einfach nur um eine grüne Wiese handelt oder um eine reich strukturierte Grünfläche?

A. Peters: Es handelt sich tatsächlich nur um die Farbe Grün auf den Satellitenbildern. Kollegen aus Leipzig haben im Rahmen des EU-Projekts Dr. FOREST⁷ in einer experimentellen Studie Personen Bilder mit unterschiedlichen Waldtypen vorgelegt. Dabei kam heraus, dass es keinen Unterschied macht, ob es sich um einen naturnahen Wald oder um eine Monokultur handelt. Und Kollegen im Mannheim haben sich die Gehirnnareale angesehen, die aktiviert werden, wenn sich Menschen an Grünflächen aufhalten.⁸ Demnach könnte es sein, dass für die Wahrnehmung des Menschen tatsächlich nur das Grün wichtig ist. Ganzheitlicher betrachtet würde ich aber davon ausgehen, dass die Biodiversität insgesamt durchaus einen Unterschied macht. Nur sind unsere Daten, die wir gegenwärtig verwenden, noch nicht in der Lage, dies darzustellen.

J. Kollmann: Durch die Biodiversität werden die Trade-offs urbaner Ökosystemleistungen und Umweltherausforderungen beeinflusst. Wenn Stadtbewohner beispielsweise Probleme mit Pollen haben, spenden Bäume zwar einen kühlen Schatten, aber wenn es sich immer um die gleiche Baumart handelt, ist die Allergiewirkung entsprechend hoch. Auch aus diesem Grund sind Baumartenmischungen vermutlich vorzuziehen.

A. Peters: Ja, deswegen sind z. B. Studien, die sich mit Asthma und Allergie befassen, nicht immer so eindeutig. Bei den Mortalitätsstudien, die ich vorgestellt habe, war die Assoziation sehr klar. Aber bei Asthma und Allergie ist die Situation komplexer, weil es möglicherweise darauf ankommt, wie viele Birken auf einer Grünfläche stehen oder wie hoch dort die Belastung an Graspollen ist.

6 Projekt EXPANSE: Exposome powered tools for healthy living in urban settings; <https://expanse-project.eu/> [abgerufen 29.07.2024].

7 Projekt Dr. FOREST (Research on how diversity of forests affects our health and well-being); <https://www.dr-forest.eu/> [abgerufen 29.07.2024]
8 Tost, H., M. Reichert, U. Braun, I. Reinhard, R. Peters, S. Lautenbach, A. Hoell, E. Schwarz, U. Ebner-Priemer, A. Zipf & A. Meyer-Lindenberg. 2019. Neural correlates of individual differences in affective benefit of real-life urban green space exposure. – Nature Neuroscience, 22: 1389–1393. DOI: [10.1038/s41593-019-0451-y](https://doi.org/10.1038/s41593-019-0451-y)

M. Schwaiger: Sie hatten zu Beginn Ihres Vortrags auch sozioökonomische Faktoren erwähnt. Gibt es Daten zu verschiedenen Wohnformen? Ist zum Beispiel das dicht gedrängte Wohnen in Hochhäusern gesundheitsschädlicher als das Wohnen in Villenvierteln, unabhängig zum Beispiel von Lärm und Luftschadstoffen und von der Entfernung zu Grünanlagen?

A. Peters: Generell ist es so, dass man größere Gesundheitseffekte in sozial benachteiligten Regionen findet. Insbesondere unsere amerikanischen Kollegen, die die gesamten Gesundheitsdaten aller Personen ab 65 Jahren auswerten, sehen einen klaren Unterschied in der Wirkung der Luftschadstoffe für Personen, die in einem benachteiligten sozialen Umfeld leben, im Vergleich zu Personen aus einem sozial begünstigten Umfeld.⁹ Das heißt, man würde in der Tat annehmen, dass Personen in Villenvierteln weniger von gesundheitlichen Auswirkungen betroffen sind. Man denkt, dass sie mehr protektive Faktoren haben, sie sind besser krankenversorgt, ernähren sich besser und ergreifen mehr präventive Maßnahmen. Deshalb wird der Begriff der Umweltgerechtigkeit gerade intensiv diskutiert.

M. Matern: Haben Sie auch Studien über die Hygiene in Städten durchgeführt?

A. Peters: Die Epidemiologie stammt zwar in ihren Ursprüngen aus dem Bereich der Hygiene. Aber wir haben die Hygiene zumindest im Exposomkontext in den großen Datenmengen noch nicht wieder betrachtet. Es ist aber eine gute Idee, sie einzubeziehen, da sie sich gut kartieren lässt.

A. Beck: Sie haben gesagt, dass die Verschneidung der Daten zum Teil etwas grob ist, was bei Satellitendaten natürlich nicht anders geht. Aber eine sehr lang etablierte Methode für die Bestimmung von Luftgüte ist die Bioindikation. Mit

Flechten gibt es beispielsweise sehr lange Traditionen, in denen Korrelationen sehr eindeutig bestimmt und festgelegt werden konnten. Sehen Sie Möglichkeiten, solche Bioindikationsstudien mit einzubeziehen?

A. Peters: Wir wären daran sehr interessiert. Ich habe die NAKO Gesundheitsstudie nur kurz angerissen. In ihr versuchen wir, auch neue Parameter einzubeziehen, die wir als Epidemiologen bisher nicht verwendet haben. Wir bräuchten diese Parameter aber in allen 16 Studienregionen in Deutschland, in denen die Gesundheitserhebungen jetzt schon laufen. Ich kenne Veröffentlichungen von Kollegen in Frankreich, die in nationalen Daten den Schwermetallgehalt in Flechten mit dem Krebsrisiko assoziiert haben. Wir haben dies bisher nicht gemacht, aber ich bin sehr interessiert daran.

B. Rutkowski: Gerade wenn es um Mortalität durch Hitze geht, geht es auch um das Thema Wasser. »Wasser in der Stadt«: Haben Sie diesen Aspekt in ihre Forschungen einbezogen?

A. Peters: Bisher noch nicht. Ich hatte das Beispiel mit der Veränderung des Herzinfarktrisikos in Augsburg vor und nach der Jahrhundertwende erwähnt. Meine persönliche Interpretation dafür, dass wir bisher die Hitzeeffekte noch nicht beobachten konnten, ist, dass Augsburg durch seine beiden Flüsse eine sehr gut ventilierte Stadt ist. Erst jetzt, wo sich die Temperaturen verändern und es überall wärmer wird, beginnen wir, auch in Augsburg die prognostizierten Hitzeeffekte bei den Herzinfarkten zu sehen. Eine Kollegin von mir, Frau Dr. Schneider, startet jetzt in Augsburg ein Projekt, in dem sie über das Jahr hinweg gezielt die Belastung von Personen mit Vorerkrankung untersuchen wird. Dabei wird auch die Möglichkeit, durch Wasser in der Stadt die Hitze abzustrahlen, berücksichtigt werden. Wenn man Szenarien für die Zukunft modelliert, wird das Wasser ein wichtiger Faktor sein, den es einzubeziehen gilt: Was passiert, wenn die Stadt so bleibt, wie sie ist, und was passiert, wenn die Wasserflächen vergrößert werden? Wie entwickelt sich in beiden Fällen das Mikroklima? Wir werden uns bemühen, Daten für diese Modellierung beizusteuern.

⁹ Josey, K. P., S. W. Delaney, X. Wu, R. C. Nethery, P. DeSouza, D. Braun & F. Dominici. 2023. Air pollution and mortality at the intersection of race and social class. – The New England Journal of Medicine, 388(15): 1396–1404. DOI: [10.1056/NEJMsa2300523](https://doi.org/10.1056/NEJMsa2300523)

M. Zelger: Ich habe eine Frage zu den Aerosolen. Wenn man die Massengrenzwerte immer weiter heruntersetzt, frage ich mich, wie man in Küstenregionen mit Seesalzen und anderen Partikeln zurechtkommt. Man müsste dann eigentlich die Stoffe nach den entsprechenden Elementen charakterisieren. Meine zweite Frage zielt auf den sehr hohen Reifenabrieb von Elektroautos. Wird dieser einfach so akzeptiert oder gibt es schon Ideen, ihn zu senken? Welche Rolle spielen die Gummipartikel aus dem Reifenabrieb?

A. Peters: Die vorgeschlagenen Richtlinien basieren auf den neuesten Studien aus Nordamerika und Europa, in denen auch Regionen mit Seesalzpartikeln dabei waren. Unser Verständnis ist, dass es auch an einem Standort, an dem Salzpartikel aus dem Wasser dominieren, genügend andere Schadstoffe gibt, die auf den Salzpartikeln sitzen, so dass die Partikelmasse deswegen so groß ist. Uns ist sehr wohl bewusst, dass dabei unterschiedliche Substanzen die größte Rolle spielen, dazu gehören der Ruß mit seiner hohen Oberflächenaktivität und Übergangsmetalle, die eine Freisetzung von Sauerstoffradikalen begünstigen können. In den neuen EU-Richtlinien wird es Ausnahmen geben, die Salzpartikel, Saharastaub und andere Partikel aus dem natürlichen Umfeld ausschließen. Unsere Daten unterstützen das aber nicht unbedingt, weil sie alles einschließen, was eingeatmet wird, und weil immer noch genug Schmutz auf diesen natürlichen Partikeln sitzt und die Partikel koagulieren. Regulatorisch wird man die natürlichen Partikel aber herausrechnen. Das ist letztlich eine Frage der Abwägung der Güter.

Zu der Frage nach den Latexpartikeln bzw. den Reifenabriebpartikeln: Wir sehen in der Nähe von Straßen durchaus Signale für diese größeren Partikel. Derzeit ist es für uns aber epidemiologisch schwer auseinanderzuhalten, ob die größeren Partikel aus dem Reifenabrieb ein Indikator sind oder ob sie einen kausalen Effekt haben. Die Toxikologie ist, soweit ich sie verstehe, nicht eindeutig in Bezug auf die Reifenabriebpartikel. Vor zehn bis zwanzig Jahren hat es dazu sehr viele toxikologische Untersuchungen gegeben, aber heute gibt es fast keine mehr. Ich denke daher, es wäre gut, in der Zukunft zusammen mit großen epidemiologischen Studien gezielt für diese Fragen toxikologische Untersuchungen durchzuführen.

M. von der Lippe: Ich habe eine Frage zu der Exposition in Abhängigkeit vom Alter. Wir wissen aus den Studien, dass hohes Alter ein Risiko ist. Gibt es auch Daten zur Risikogruppe der Kleinkinder, Kinder und Jugendlichen, die zum Beispiel zu Maßnahmen an Schulen führen können?

A. Peters: Kinder sind, wie auch ältere Personen, eine vulnerable Gruppe. Ein belgischer Kollege hat sich die Auswirkung der Luftschadstoffe von der Zeit im Mutterleib bis in das frühe Kindesalter angesehen und konnte zeigen, dass es biologische Effekte sowohl im Uterus als auch in den frühen und in den späteren Kindheitsphasen gibt.¹⁰ Gerade die ultrafeinen Partikel, d. h. feste Partikel, die aus den Verbrennungsprozessen stammen, können sich im ganzen Körper verteilen, wie Herr Dr. Kreyling aus dem Helmholtz-Zentrum München gezeigt hat.¹¹ Sie gelangen auch in die Plazenta und, wenn sie sehr klein sind, ins Fruchtwasser. Der Kollege aus Belgien konnte die Partikel tatsächlich in der Plazenta nachweisen, wo sie oxidativen Stress bedingen, und man kann die ersten Auswirkungen dort zeigen. Bei Kindern ist in Bezug auf die Luftschadstoffe zum einen das Lungenwachstum reduziert und zum anderen verändern sich die kognitiven Fähigkeiten. Gerade die frühe Entwicklung wird durch die Luftschadstoffe beeinträchtigt.

C. Fischer: Erzeugen diese ultrafeinen Partikel nicht eine subchronische Entzündungsreaktion?

A. Peters: Wir haben gegenwärtig eine Regulierung für Feinstaub, NO₂ und Ozon, aber nicht für ultrafeine Partikel, also Partikel, die kleiner als 100 nm sind. Sie deponieren sich in den ge-

10 Saenen, N. D., D. S. Martens, K. Y. Neven, R. Alfano, H. Bové, B. G. Janssen, H. A. Roels, M. Plusquin, K. Vrijens & T. S. Nawrot. 2019. Air pollution-induced placental alterations: an interplay of oxidative stress, epigenetics, and the aging phenotype? – *Clinical epigenetics*, 11: 124. DOI: [10.1186/s13148-019-0688-z](https://doi.org/10.1186/s13148-019-0688-z)

11 Semmler-Behnke, M., J. Lipka, A. Wenk, S. Hirn, M. Schäffler, F. Tian, G. Schmid, G. Oberdörster & W. G. Kreyling. 2014. Size dependent translocation and fetal accumulation of gold nanoparticles from maternal blood in the rat. – *Particle and Fibre Toxicology*, 11: 33. DOI: [10.1186/s12989-014-0033-9](https://doi.org/10.1186/s12989-014-0033-9)

samten Atemwegen und können sich im Körper verteilen. Aus den oberen Atemwegen können sie über den Riechnerv in das Gehirn wandern, in den unteren können sie sich aus der Lunge ins Blut und damit in den Körper verteilen. Dies tun aber nur sehr wenige Partikel. Sie können aber mit anderen Partikeln interagieren, sie können Entzündungsreaktionen auslösen oder zum Beispiel die Blutgerinnung verändern. Frühere Experimente aus Amerika belegen, dass nach einer Injektion ultrafeiner Partikel in die Blutbahn ein induziertes Blutgerinnsel größer wird. Das macht es sehr plausibel, dass bei jemand, bei dem gerade ein Herzinfarkt entsteht, das Blutgerinnsel, das in den Koronararterien auftritt, größer wird. Das heißt, ultrafeine Partikel beeinflussen und verstärken das Krankheitsgeschehen.

G. Churkina: Der Bausektor bietet in Bezug auf Luftverschmutzung als Lösung Luftsysteme an, bei denen man die Fenster nicht mehr öffnen kann. Die Luft zirkuliert dann innerhalb des Raums und wird über Filter gereinigt. Solche Lösungen werden nicht nur in den USA sehr häufig implementiert, sondern auch in Asien und zunehmend in Deutschland. Wir verbringen im Alltag 80 bis 90 Prozent unserer Zeit in Innenräumen. Wie beurteilen Sie diese Lösung, sich von der Außenluft abzugrenzen?

A. Peters: Es gibt in der Tat Studien, die zeigen, dass es für Personen, die sich häufig in Räumen mit gefilterter Luft aufhalten, positive Effekte gibt, weil man damit die Auswirkungen der Luftschadstoffe minimieren kann. Das Problem ist natürlich, dass sich damit der Innenraum verändert und es möglicherweise zu anderen Problemen kommt wie zum Beispiel zu Schimmelbefall. Ich halte diese Luftsysteme zwar für nützlich, wenn es um eine kurzfristige Maßnahme geht, aber langfristig sind sie aus meiner Sicht komplett undiskutabel, weil wir als Menschen im Freien leben wollen. Herr Schwaiger hat die sozioökonomischen Unterschiede eben angesprochen. Wenn zum Beispiel die Lebensmittel und alle anderen Einkäufe nur noch über Boten ins Haus gebracht werden, weil draußen die Luftverschmutzung so hoch ist, ist das keine Gesellschaft, in der ich leben wollen würde. Wir als Epidemiologen stehen ganz klar hinter der Regulierung von Außenluftschadstoffen entsprechend der Empfehlung der WHO, auch wenn das schwierig ist und möglicherweise sehr lange dauern wird. Gerade in den stark verschmutzten Metropolen der Welt muss man viele Prozesse umbauen, um die Luftschadstoffen auf ein Level zu bekommen, das wir heute in München haben, und auch wir in München müssen uns weiter anstrengen, um unsere Luftqualität zu verbessern.