

Ickstadt, Katja et al.

Article — Published Version

Beschleunigung umweltpolitischer Entscheidungen durch verlässliche Daten und effiziente statistische Methoden

AStA Wirtschafts- und Sozialstatistisches Archiv

Provided in Cooperation with:

Springer Nature

Suggested Citation: Ickstadt, Katja et al. (2025) : Beschleunigung umweltpolitischer Entscheidungen durch verlässliche Daten und effiziente statistische Methoden, AStA Wirtschafts- und Sozialstatistisches Archiv, ISSN 1863-8163, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 19, Iss. 3-4, pp. 113-159,
<https://doi.org/10.1007/s11943-025-00360-w>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/336719>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Beschleunigung umweltpolitischer Entscheidungen durch verlässliche Daten und effiziente statistische Methoden

Katja Ickstadt · Susanne Breitner-Busch · André Conrad ·
Andreas Diekmann · Christina Elmer · Simon Felgendreher ·
Roland Fried · Sarah Friedrich · Kateryna Fuks · Andreas Groll ·
Andreas Hense · Claudia Hornberg · Helmut Küchenhoff ·
Heinz Leitgöb · Friederike Paetz · Walter J. Radermacher ·
Simon Schürz · Kathrin Wolf

Eingegangen: 30. Mai 2024 / Angenommen: 6. Oktober 2025 / Online publiziert: 6. November 2025
© The Author(s) 2025

Zusammenfassung Die Dringlichkeit ist gut belegt: Klimawandel, Biodiversitätskrise und diverse andere Umweltprobleme führen nicht nur zu wirtschaftlichen Schäden immer größeren Ausmaßes – auch die Bevölkerung ist von den Auswirkungen auf die Gesundheit und den Lebensraum direkt betroffen. Klare Entscheidungen und wirksame Maßnahmen sind unmittelbar erforderlich. Jedoch sind die Wirkungszusammenhänge oftmals global, komplex und schwer nachzuweisen und daher Wirkungen von Maßnahmen nur mit großer Unsicherheit zu prognostizieren. Öffentliche Debatten und politische Akteure benötigen daher mehr denn je belastbare Daten und verlässliche Methoden. Nur so lässt sich verwirklichen, was notwendig ist.

Dieser Artikel beschreibt den aktuellen Wissensstand und zentrale Methoden in fünf wesentlichen Bereichen der Umweltstatistik. Wie lassen sich die Leistungen der Ökosysteme für den Menschen quantifizieren? Wie wirken Umweltfaktoren auf die Gesundheit? Was beeinflusst die Akzeptanz von Umweltmaßnahmen? Wie lassen sich Wege zur Eindämmung des Klimawandels evidenzbasiert entwickeln und bewerten? Und welche Daten müssen für die genannten Fragestellungen erhoben und verknüpft werden?

Mit Expertisen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Umweltstatistik wie Umweltepidemiologie, Umwelthandeln, Ökosysteme und Klimawandel liefert dieser Beitrag den wissenschaftlichen Kontext für aktuelle Entwicklungen und drängende

André Conrad (Autorenschaft für Kapitel 2), die Ansichten in diesem Kapitel spiegeln jene des Autors und nicht des UBA wider.

Simon Felgendreher, die Ansichten in diesem Artikel spiegeln jene des Autors und nicht des StBA wider.

Simon Schürz, die Ansichten in diesem Artikel spiegeln jene des Autors und nicht des StBA wider.

Ausführliche Informationen zu den Autoren befinden sich auf der letzten Seite dieses Artikels.

Entscheidungen. Relevante Evidenz für den öffentlichen Diskurs und die politische Meinungsbildung basiert dabei auf verlässlichen Daten und effizienten statistischen Methoden. Hier werden durchaus Bedarfe und Potenzial für Verbesserungen gesehen. Drei Forderungen an die Politik kondensieren daher schließlich dringende Bedarfe, die sich aus der umweltstatistischen Forschung ergeben und nur mithilfe staatlicher Regelungen umgesetzt werden können.

Schlüsselwörter Datenzugang · Empfehlungen · Klimawandel · Ökosysteme · Umweltepidemiologie · Umwelthandeln

Accelerating environmental policy decisions through reliable data and efficient statistical methods

Abstract The urgency is well documented: Climate change, the biodiversity crisis and other environmental problems are not only leading to economic damage on an ever-increasing scale—the population is also directly affected by their impacts on health and the living environment. Clear decisions and effective measures are needed immediately. However, the interdependencies are often global, complex and challenging to prove and, therefore, the effects of measures can only be predicted with great uncertainty. Public debates and political actors need reliable data and methods more than ever. This is the only way to achieve the necessary actions.

This article describes the current state of knowledge and central methods in five key areas of this research field. How can the benefits of ecosystem services for humans be quantified? How do environmental factors affect health? What influences the awareness and acceptance of environmental measures? How can ways to mitigate climate change be developed and evaluated based on evidence? And what data need to be collected and linked to answer these questions?

With expertise from various fields of environmental statistics, such as environmental epidemiology, environmental behaviour, ecosystems and climate change, this article provides the scientific context for current developments and urgent decisions. Relevant evidence for the public discourse and political opinion forming is based on reliable data and efficient statistical methods. There is certainly a need and potential for improvement here. Therefore, three demands for policymakers finally condense urgent needs arising from environmental statistics research that can only be implemented with the help of government regulations.

Keywords Data access · Recommendations · Climate change · Ecosystems · Environmental epidemiology · Environmental actions

1 Einleitung

Im Winter 2022/23 blieben viele Wohnungen und Büros in Deutschland kälter als in den Vorjahren, der Energieverbrauch sank deutlich. Die unsichere Versorgungslage und steigende Preise ließen Haushalte, Behörden und Unternehmen sparen. Viele

Menschen drehten ihre Heizungen weniger auf, in öffentlichen Gebäuden wurden Temperatur und Beleuchtung reduziert. Zwar waren diese Maßnahmen nicht ausschließlich auf den Schutz der Umwelt ausgerichtet, sollten sie doch hauptsächlich Kosten reduzieren und eine Mangellage verhindern. Dennoch hatte das Sparen klare positive Auswirkungen auf Energiebilanzen und Emissionen (Behr et al. 2024). Die beschriebene Reaktion steht damit exemplarisch für Adaptionseffekte im Bereich der Umweltwirkungen (Abbass et al. 2022).

Jedoch charakterisieren Unsicherheiten und Interdependenzen das Umwelthandeln. In komplexen Systemen lassen sich Risiken nicht isoliert voneinander verstehen, sondern nur im Zusammenhang aller Faktoren ergründen (siehe Abb. 1). Dies wurde auch in der COVID-19-Pandemie deutlich, als Lockdowns den Berufs- und Flugverkehr stark reduzierten und die Produktivität drosselten. Zumindest temporär hatte dies zahlreiche positive Effekte auf Umwelt und Klima: Treibhausgasemissionen und Abgasbelastung sanken, die Wasserqualität stieg, maritime Ökosysteme erholten sich und Lebensräume von Wildtieren breiteten sich aus (z.B. Bar 2021; Khan et al. 2021; Mousazadeh et al. 2021; Naseer et al. 2022; Ray et al. 2022).

Gegenläufige Auswirkungen auf die Umwelt sind infolge des andauernden Angriffskriegs Russlands in der Ukraine zu beobachten. Ein Grund hierfür sind unmittelbare Zerstörungen durch Explosionen und großflächige Brände vor Ort (z.B. Pereira et al. 2022; Zalakeviciute et al. 2022; allgemein: Lawrence et al. 2015). Zudem stieg die Emissionsbelastung durch die mit dem Krieg verbundene Aufrüstung zahlreicher Länder und die massenhafte Bewegung von militärischem Gerät drastisch. Eine Analyse (Bun et al. 2024) schätzt die zusätzlichen Treibhausgasemissionen mit direktem Bezug zum Krieg auf 77 Megatonnen CO₂-Äquivalente (Mt CO₂-eq) – etwa so viel, wie das Land Österreich pro Jahr emittiert (Quelle: EDGAR 2023). Hinzu kommen die ökonomischen Kriegsfolgen im Energiesektor, die unterschiedliche Reaktionen in wirtschaftlichen Sektoren und gesellschaftlichen Bereichen nach sich ziehen. Dazu gehört wiederum auch das Energiesparen.

Umweltwirkungen werden in akuten Krisen also vielfach ausgelöst, ob mittelbar oder unmittelbar. Entsprechend steigt ihre Bedeutung im gesellschaftspolitischen Diskurs und in der Wissenschaft seit Jahren (z.B. Gellrich et al. 2021). Jedoch stehen sie in aktuellen Debatten nur selten im Fokus, wenn es primär um die Risikoeinschätzung für die kommenden beiden Jahre geht (z.B. WEF 2024; siehe Abb. 2). Erst wenn weiter in die Zukunft geschaut und die nächsten zehn Jahre betrachtet werden, schaffen es Umweltrisiken ganz oben auf die Agenda, sowohl in der Politik als auch in der Wirtschaft. Eine Ausnahme davon sind Extremereignisse meteorologischer, klimatologischer und hydrologischer Art, die mit Prognosen über Zeiträume zwischen wenigen Stunden und mehreren Monaten verbunden sind. Beispiele sind die Starkniederschläge im Sommer 2021 oder die Sturmereignisse im Frühjahr 2022. Derartige Extreme bergen erhebliche Unsicherheiten und große sozio-ökonomische Risiken.

Die Wissenschaft schaut zudem möglichst ganzheitlich auf Umweltwirkungen, verdeutlicht etwa durch das Konzept der planetaren Belastbarkeitsgrenzen (siehe Abb. 3), die von einem internationalen Forschungsteam quantifiziert worden sind. Das Update aus dem Jahr 2024 gibt einen breiten und gleichzeitig detaillierten Überblick über die schwindende Widerstandsfähigkeit unseres Planeten. Sie wird

FIGURE D Global risks landscape: an interconnections map

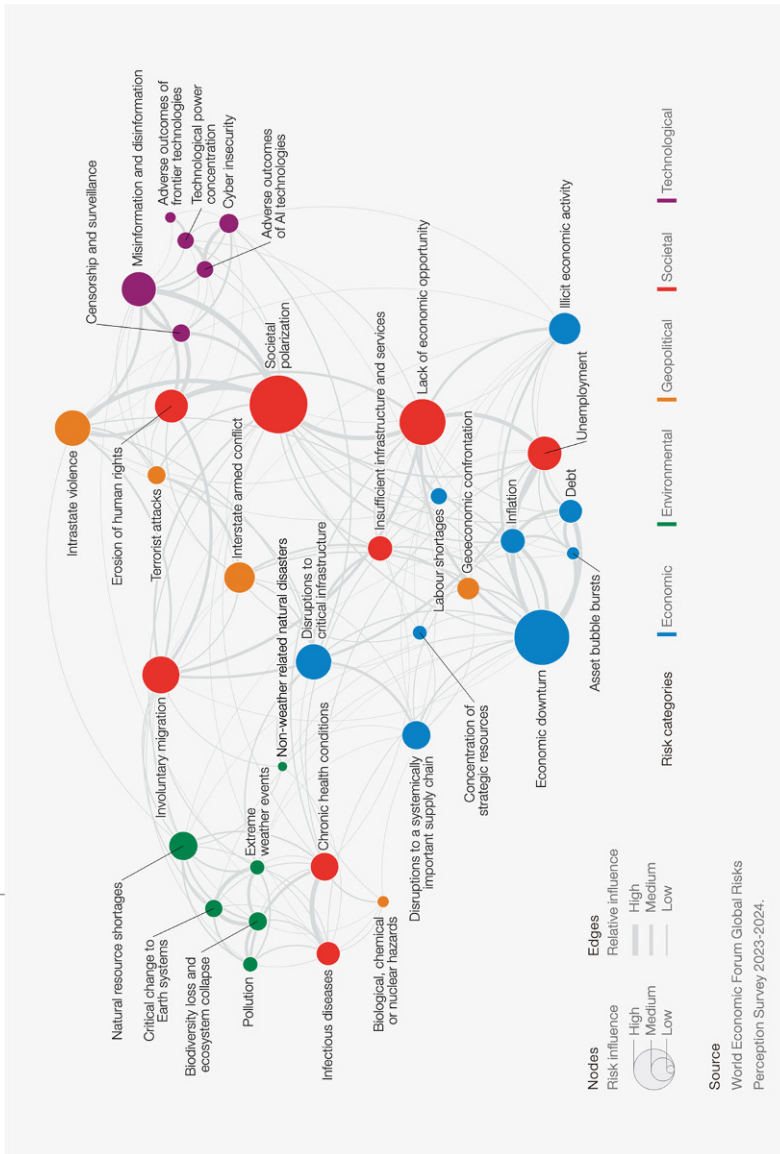


Abb. 1 Globale Risiken und ihre Verbindungen. (Quelle: WEF 2024, S. 9)

charakterisiert durch globale Erwärmung, Risiken für die Biosphäre, eine zunehmende Entwaldung, die Belastung durch Schadstoffe und Plastik sowie den Zustand der globalen Stickstoffkreisläufe und der Süßwasservorkommen:

„Sechs von neun der planetaren Grenzen sind heute überschritten. Gleichzeitig wächst der Druck globaler Prozesse auf diese Grenzen weiter.“ (PIK 2022).

Wir stehen folglich vor immensen Herausforderungen und notwendigen Transformationen in großen Bereichen des Wirtschaftens, des Lebens und Zusammenle-

bens. Damit ist die Umweltstatistik mehr als nur eine empirische und analytische Wissenschaft, die den Zustand der Umwelt und deren Veränderung beschreibt. Vielmehr geht es heute darum, rechtzeitig qualitativ hochwertige Evidenz für politische Entscheidungsprozesse bereitzustellen und den öffentlichen Diskurs mit belastbaren statistischen Informationen zu versorgen, was verlässliche Daten benötigt. Nur so kann das Machbare aus der Erkenntnis des Notwendigen (siehe Eppler 1975) gesellschaftlich wie politisch gelingen.

Als Konsequenz prägen Umweltthemen in zunehmendem Maße politische Strategien und Entscheidungsprozesse. Normative Konzepte für eine nachhaltige Entwicklung sind inzwischen etabliert. Global wirkt vor allem die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (Vereinte Nationen 2016) mit ihren 17 Zielen und internationalen Indikatoren (Vereinte Nationen 2017) für eine sozial, wirtschaftlich und ökologisch nachhaltige Entwicklung. An diesen Zielen orientiert sich auch die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (DNS), die dafür bundesweite Indikatoren definiert. Das Statistische Bundesamt begleitet das Monitoring und die Weiterentwicklung dieser Nachhaltigkeitsindikatoren auf einer eigens eingerichteten DNS-Online-Plattform (Statistisches Bundesamt 2023).

Die Europäische Union (EU) will die Agenda-2030-Strategie der Vereinten Nationen mittels einer Bündelung von unterschiedlichen Maßnahmen erreichen, an deren Spitze der europäische Green Deal von 2019 und das sogenannte Europäische Semester mit einer umfangreichen Datenanalyse steht (Europäische Kommission o.J.). Im Green Deal ist unter anderem vorgesehen, bis 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen sowie das Naturkapital der EU zu schützen, zu bewahren und zu verbessern. Die Bedeutung der Verfügbarkeit von Daten zur Quantifizierung von Umweltwirkungen wird auch im Green Deal vielfach thematisiert. Unter anderem will die Kommission Unternehmen bei der „Entwicklung standardisierter Verfahren für die Naturkapitalbilanzierung“ unterstützen.

Einen Fokus auf Umweltwirkungen hat ebenfalls die auf der Weltnaturkonferenz in Montreal getroffene Vereinbarung des „Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework“. Ihr zentrales Ziel: Mindestens 30 % der weltweiten Land- und Meeresfläche sollen bis 2030 unter effektiven Schutz gestellt sein. Zudem beschreibt die Vereinbarung ein entsprechendes Monitoring (Vereinte Nationen 2022; BMUV 2022). Darin finden sich sowohl bereits klar definierte Indikatoren als auch solche, die noch konkretisiert werden müssen. Zu letzteren gehören beispielsweise der Indikatoren „Anteil der natürlichen Ökosysteme“ (A.2) und „Ökosystemleistungen“ (B.1), der Trends für Bereitstellungs-, Regulierungs- und kulturellen Leistungen von Ökosystemen ausweisen soll.

In Deutschland benennt der Jahreswirtschaftsbericht 2023 (BMWK 2023) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz einige Ziele, die in direktem Zusammenhang mit umweltstatistischen Anforderungen stehen. So unterstütze die Bundesregierung den „Aufbau der Ökosystemrechnungen als neues Modul der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) beim Statistischen Bundesamt“. Perspektivisch sei auch eine monetäre Bewertung der Ökosystemleistungen in Deutschland denkbar. An anderer Stelle heißt es im Bericht, die öffentliche Hand beteilige sich „am Aufbau eines Systems zur Berechnung von Klima- und Umweltkosten“. Im Sonderkapitel zur Wohlfahrtsmessung wird zudem die Verfügbarkeit

FIGURE C Global risks ranked by severity over the short and long term
"Please estimate the likely impact (severity) of the following risks over a 2-year and 10-year period."



Abb. 2 Umwelt Risiken werden mittel- und langfristig als deutlich relevanter eingeschätzt. (Quelle: WEF 2024, S. 8)

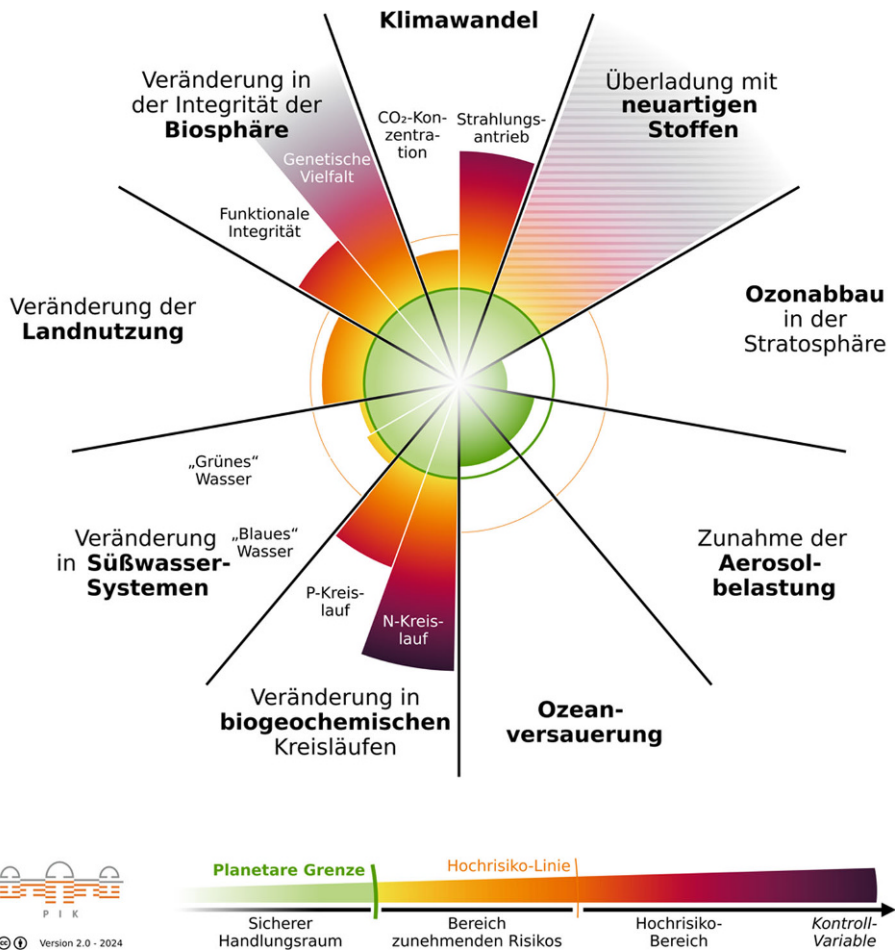


Abb. 3 Planetare Grenzen (Planetary Health Check 2024). (Quelle: PIK 2024)

aussagekräftiger und aktueller Daten als grundlegendes Kriterium für die Auswahl der Indikatoren beschrieben – in Einzelfällen komme es dabei allerdings zu zeitlichen Verzögerungen. Grundsätzlich zieht der Jahreswirtschaftsbericht eine direkte Verbindung zwischen Wirtschaft und Ökologie: „Gesellschaft und Wirtschaft sind eingebettet in die ökologischen und atmosphärischen Prozesse des Planeten“.

Die genannten Strategien und Zielsetzungen verdeutlichen, wie übergreifend und ganzheitlich Umweltwirkungen derzeit im politischen Diskurs wahrgenommen werden. Das entspricht auch der Entwicklung der Umweltstatistik und entsprechender Messinstrumente. Diese Entwicklung folgt seit fünf Jahrzehnten von Umweltrisiken ausgelösten historischen Episoden: Zunächst wurden vor allem Mengen- und Preisänderungen betrachtet, um die quantitative Erschöpfung der natürlichen Ressourcen zu erfassen. Später kamen lokale und regionale Qualitätsveränderungen hinzu, etwa die Verschlechterung der Luft- und Wasserqualität. Es folgte die Analyse globaler Phänomene wie stratosphärischer Ozonverlust und Klimawandel, inklusive der

regionalen Auswirkungen – und schließlich der Blick auf Ökosysteme und biologische Vielfalt. Das Modell der planetaren Grenzen steht exemplarisch für diese vierte Phase, die über die Messung der einzelnen Bestände und Zustände der Natur hinausgeht und sich auf die Wechselbeziehungen zwischen Natur, Wirtschaft und sozialen Prozessen erstrecken muss. Mit Bezug auf die Geosysteme hat die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina eine holistische Betrachtung eingefordert (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2022). Lokale und regionale, nationale und globale Dimensionen müssen hier gleichzeitig betrachtet werden.

Eine weitere Herausforderung betrifft die Verflechtung der Sektoren: Umweltfragen und Umweltpolitik lassen sich immer weniger trennen von ökonomischen Themen, wie internationale Wettbewerbsfähigkeit des industriellen Standorts, oder sozialen Fragen, wie der Auswirkungen von Preissteigerungen infolge von Umweltschutzauflagen für einkommensschwächere Bevölkerungsgruppen. Für die Statistik ist dies in mehrfacher Hinsicht herausfordernd, und zwar nicht zuletzt deshalb, weil es an einem breiten wissenschaftlichen Konsens hinsichtlich der theoretischen Basis aus den Disziplinen der Umweltökonomie¹ und ökologischen Ökonomik². bislang mangelt, auf dem man statistische Konventionen hinsichtlich des Designs von Statistiken, Gesamtrechnungen und Indikatoren aufbauen könnte (Radermacher 2020). In Deutschland und international sind einerseits im Verlaufe der vergangenen Jahrzehnte erhebliche Fortschritte gelungen, insbesondere von Gesamtrechnungssystemen, wie dem internationalen System of Environmental-Economic Accounting (SEEA)³ und der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen⁴. Andererseits ist es noch nicht gelungen, auf die Qualität der Wirtschaftsstatistiken bezüglich Aktualität, Relevanz und inhaltlicher Aussagefähigkeit aufzuschließen. Die fortschreitende Verschärfung von Umweltproblemen und -risiken erfordert es, möglichst rasch mit der Entwicklung von statistischen Gesamtrechnungssystemen voranzukommen. Hierfür bedarf es zum einen der methodischen Zusammenarbeit über die Grenzen von fachlichen Disziplinen und bislang getrennten Anwendungsbereichen hinaus. Zweitens stellen sich Anforderungen an die Verfügbarkeit und Verknüpfung von Daten unterschiedlicher Quellen mit den darin enthaltenen Problemen hinsichtlich der Einhaltung von Datenschutzauflagen. Drittens geht es um Gesamtrechnungen auf der Makro-Ebene, die eine integrierte, konsistente Analyse von Ökonomie und Natur ermöglichen (wie in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen). Schließlich stellen sich neue Herausforderungen an die Kommunikation von statistischen Informationen, wenn diese von anderen Nutzergruppen als den professionellen Experten und Expertinnen der jeweiligen Fachdisziplin verstanden und in ihrer Qualität beurteilt werden sollen.

Damit wird ein Themenbereich eröffnet, dem an dieser Stelle nur (zu) wenig Platz eingeräumt werden kann: Vertrauenswürdigkeit, Qualität und Relevanz von statistischen Informationen. Unabhängig von den speziellen Aspekten im Umweltbereich ergeben sich hier in modernen Gesellschaften mit ihren sogenannten ‚Daten-Ökosystemen‘, mit den Meinungsbildungsprozessen im Journalismus und auf sozialen

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Umwelt%C3%B6konomik>.

² https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96kologische_%C3%96konomie.

³ <https://seea.un.org/>.

⁴ https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/_inhalt.html.

Netzwerken, sowie mit neuen Technologien wie Künstlicher Intelligenz, völlig neue Herausforderungen und Chancen. Zusätzlich eröffnen gerade im Umweltbereich neue Formen der Partizipation, der Citizen Science und der Co-Creation methodisch und praktisch bisher unbekannte oder wenig genutzte Möglichkeiten, gleichzeitig Datenquellen zu erschließen und Vertrauen zugunsten der Statistik aufzubauen. (Ver-einte Nationen 2022).

Die Kommission Zukunft der Statistik (KomZS) hat in ihrem Bericht 2024 Empfehlungen für die Modernisierung der (amtlichen) Statistik in Deutschland ausgesprochen (Kommission Zukunft Statistik 2024). Hierbei geht es um grundlegende Fragen der Governance, des Zugangs der Wissenschaft zu Daten, Umgang mit dem Datenschutz und Bürokratieabbau, damit die Statistik den oben genannten Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft gerecht werden kann. Von der KomZS wurde als Fallstudie auch der Bereich ‚Beyond GDP‘ näher untersucht, mit Empfehlungen, die insbesondere für die in diesem Beitrag im Mittelpunkt stehenden Themen, wie Ökosysteme und Biodiversität relevant sind.

Angesichts dramatischer globaler Umweltrisiken stellt sich die Frage, wie es der Umweltstatistik nach fünf Jahrzehnten Umweltpolitik gelingen kann, die breit anerkannte Zielsetzung einer nachhaltigen Entwicklung effektiv und im gebotenen Tempo voranzutreiben. Auch in gesellschaftlichen und politischen Debatten werden zuverlässige Statistiken immer relevanter, um Störmanöver und Desinformationskampagnen zu entschärfen. Welche Herausforderungen in den unterschiedlichen Fachgebieten der Umweltstatistik dafür zu bewältigen sind und welche Forderungen an die Politik sich daraus ergeben, lesen Sie in den folgenden Kapiteln dieses Artikels.

2 Umweltepidemiologie⁵

Der im Mai 2021 von der Kommission der EU angenommene EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“ (Europäische Kommission 2021) ist ein wichtiger Teil des Europäischen Green Deals (Europäische Kommission 2019a, b). Der Aktionsplan folgt der „Null-Schadstoff-Vision für 2050“, die zum Ziel hat, die Verschmutzung so weit zu reduzieren, „dass sie für die menschliche Gesundheit und die natürlichen Ökosysteme keine Gefahr mehr darstellt.“ (Europäische Kommission 2023). Neben der mit dem Aktionsplan adressierten Umweltverschmutzung stellt auch der Klimawandel eine zentrale planetare Krise dar (siehe Abb. 3), die für die menschliche Gesundheit eine gravierende Bedrohung ist.

Die Umweltepidemiologie leistet für die Bewältigung dieser planetaren Krisen wichtige Beiträge. Sie beschäftigt sich mit der Erforschung von Assoziationen zwischen Umweltfaktoren und gesundheitlichen Wirkungen in der Bevölkerung sowie mit der Untersuchung der Kausalität dieser Assoziationen. Neben gesundheitsförderlichen Umweltfaktoren wie urbane Grün- und Wasserflächen, Fußgänger- und Fahrradfreundlichkeit des Wohnortes stehen vor allem gesundheitsschädliche Um-

⁵ Für den Beitrag in diesem Kapitel danken wir Barbara Hoffmann (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf).

weltfaktoren im Fokus, wie zum Beispiel die Verschmutzung verschiedener Umweltmedien wie Luft, Wasser und Boden. In diesem Zusammenhang sind auch Chemikalien von hoher Bedeutung, wie z. B. die per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) (z. B. Hölzer et al. 2008; Rathjens et al. 2021).

In diesem Kapitel legen wir einen Schwerpunkt auf Schadstoffe in der Außenluft. Der oben genannte EU-Aktionsplan setzt dafür bis 2030 ein konkretes Ziel, nämlich „eine Reduzierung der gesundheitlichen Auswirkungen (vorzeitige Todesfälle) der Luftverschmutzung um mehr als 55 %“ (Europäische Kommission 2021).

Eine wichtige Rolle in der Festsetzung umweltpolitischer Grenzwerte für Luftschadstoffe zum Schutz der menschlichen Gesundheit spielen die von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) durchgeführten Risikobewertungen und veröffentlichten Empfehlungen wie die neueste Fassung der WHO-Luftqualitätsleitlinien (Air Quality Guidelines (AQG)) zum Schutz der öffentlichen Gesundheit (WHO 2021). Sie dienen der Beurteilung von möglichen Gesundheitsrisiken in der Bevölkerung. Diese Informationen können auch von Entscheidungsträgern bei der Festlegung rechtsverbindlicher Normen und Ziele für das Luftqualitätsmanagement, z. B. bei der aktuellen Revision der EU-Luftqualitätsrichtlinie, herangezogen werden. Die WHO-Luftqualitätsleitlinien stützen sich primär auf umweltepidemiologische Studien.

Die Festlegung von umweltpolitischen Grenzwerten ist in der Regel ein Kompromiss, der epidemiologische Erkenntnisse und die Machbarkeit der Schadstoffminderungen berücksichtigt. In der EU wird die Luftqualität durch die EU-Luftqualitätsrichtlinie (Europäische Kommission 2008) geregelt. Sie legt Grenz- und Zielwerte für Luftschadstoffe wie Feinstaub ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}), Stickstoffdioxid (NO_2) oder bodennahes Ozon (O_3) u. a. auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse und technischer Umsetzbarkeit fest. Derzeit überarbeitet die EU die Richtlinie inklusive einer Aktualisierung der Grenzwerte, da eine Überprüfung (Fitness-Check) gezeigt hat, dass die geltenden Grenzwerte zwar zu einer Verbesserung der Luftqualität beigetragen haben, nach wie vor aber eine erhebliche Gesundheitsbelastung besteht. Am 24. April 2024 hat das EU-Parlament der im Februar 2024 erfolgten Einigung im Trilog vorläufig zugestimmt.

2.1 Studientypen

Daten aus Epidemiologischen Beobachtungsstudien und deren Analysen bilden die wichtigste Grundlage für die Risikobewertung, da es aus ethischen Gründen meist nicht zulässig ist, die Studienteilnehmenden den Umweltrisikofaktoren unter experimentellen Bedingungen gezielt auszusetzen. Außerdem können Langzeiteffekte nur im Rahmen einer Beobachtungsstudie erfasst werden, da dies in einer experimentellen Studie aus praktischen Gründen nicht möglich wäre.

In einer *Kohortenstudie* werden zunächst gesunde Personen über längere Zeit (bis zum Auftreten der Zielerkrankung) beobachtet. Dabei wird das Studienkollektiv nach der beobachteten Exposition (exponiert oder nicht exponiert) aufgeteilt oder das Expositions-niveau kontinuierlich erfasst und bewertet (Woeckel et al. 2019). Im Rahmen von Kohortenstudien wird die Exposition gegenüber Schadstoffen somit bereits vor dem Auftreten von Erkrankungen erfasst, was eine Beurteilung der Kau-

salität der untersuchten Wirkungen bei Verwendung adäquater statistischer Verfahren erlaubt. Die prospektiven Kohortenstudien gelten deswegen als der Goldstandard für die Erfassung von Langzeiteffekten einer Umweltexposition in der Bevölkerung.

Kohortenstudien, die nach strengen Qualitätsstandards durchgeführt wurden, sind für die Risikobewertung besonders wertvoll. So haben zahlreiche Einzelstudien (z. B. Hoffmann et al. 2007; Krämer et al. 2010) aber auch große multizentrische Kohortenstudien (Raaschou-Nielsen et al. 2013; Beelen et al. 2014; Brunekreef et al. 2021) eine wichtige Evidenzbasis über die Auswirkungen von Luftschadstoffen (vor allem auch im Niedrigdosis-Bereich) und Lärm (Orban et al. 2016; Pitchika et al. 2017) auf die Gesundheit geliefert.

Eine Kohortenstudie verfügt häufig über ein großes Studienkollektiv mit tausenden Teilnehmenden. Damit wäre eine direkte Erfassung der Exposition durch Messungen für die gesamte Studienpopulation meist nur unter dem Einsatz großer finanzieller und personeller Ressourcen sinnvoll durchführbar, die in der Forschungspraxis nicht zur Verfügung stehen. Daher wird die Exposition in Kohortenstudien oft geschätzt, z. B. über Modellierungen der Schadstoffbelastungen für das Studiengebiet. Dabei können die Umweltdaten, die von Ämtern oder Gemeinden erhoben und ggf. öffentlich zur Verfügung gestellt werden, für die Schätzung der Exposition mit genutzt werden. So flossen z. B. die amtlichen Luftschadstoffmessungen in europaweite Luftschadstoffmodelle ein (de Hoogh et al. 2018) oder wurden die Lärmkarten der Gemeinden direkt zur Abschätzung der Lärmexposition am Wohnort den Teilnehmenden zugewiesen (Orban et al. 2016; Pitchika et al. 2017).

Fall-Kontroll-Studien kommen in umweltepidemiologischen Fragestellungen häufig bei der Erforschung seltener Erkrankungen wie spezifischer Krebserkrankungen zum Einsatz, da eine Kohortenstudie hier eine sehr große Stichprobe und einen beachtlichen finanziellen und personellen Aufwand erfordern würde (Woeckel et al. 2019). Für eine Fall-Kontroll-Studie werden zunächst die Fälle ausgewählt (z. B. Personen mit einer diagnostizierten Erkrankung). Anschließend wird eine vergleichbare Kontrollgruppe (nicht an der untersuchten Krankheit erkrankte Personen, die aber ansonsten vergleichbar sind) ausgesucht. Dieses Vorgehen ermöglicht eine ressourcensparende und schadstoffspezifische Erhebung und kann erste Hinweise auf kausale Zusammenhänge liefern.

Die Erfassung der Exposition läuft in einer Fall-Kontroll-Studie retrospektiv. Die Exposition wird häufig direkt gemessen, wie z. B. in einer gepoolten europäischen Indoor-Radon-Studie (Darby et al. 2005). Manchmal aber findet auch in Fall-Kontroll-Studien die Schätzung der Exposition mithilfe von öffentlichen Umweltdaten ihre Anwendung. So wurde die Straßenverkehrsexposition der Teilnehmenden in der NaRoMi Fall-Kontroll-Studie (Noise and Risk of Myocardial Infarction) auf Grundlage der Lärmkartierung der Stadt Berlin bestimmt (Umweltbundesamt 2004). In einer Fall-Kontroll-Studie zum Präeklampsie-Risiko in Kalifornien wurde die Feinstaubbelastung anhand von Monitoring-Daten und die Wohngrün-Qualität anhand von Satelliten-Aufnahmen geschätzt (Weber et al. 2021).

Auch *Querschnittstudien* werden für umweltepidemiologische Fragestellungen herangezogen. Dabei werden die Exposition und der Gesundheitsstatus in einer Bevölkerungsstichprobe einmalig und gleichzeitig erfasst (Woeckel et al. 2019). Somit

eignen sich Querschnittstudien gut als (bevölkerungsrepräsentative) „Momentaufnahmen“ über die Prävalenz von Exposition und Erkrankung.

Außerdem sind sie vergleichsweise ressourcensparend und weniger zeitaufwändig als etwa Kohortenstudien. Eine Querschnittstudie kann helfen, neue Hypothesen zu generieren oder noch unbekannte Umweltrisiken zu identifizieren. Die Aussagekraft der Querschnittstudien hinsichtlich der Kausalität ist in der Regel sehr beschränkt, weil die Exposition und die Erkrankung gleichzeitig erfasst werden. Somit ist nicht einzuschätzen, ob die kontemporäre Exposition für die Erkrankung möglicherweise ätiologisch nicht relevant ist. Außerdem ist das Verzerrungsrisiko groß (Savitz und Wellenius 2022). Allerdings kann man manchmal anhand von historischen Daten (z.B. Archivdateien) oder Bioproben (z.B. Blei in Milchzähnen) die Exposition in der Vergangenheit rekonstruieren (Savitz und Wellenius 2022). Deswegen spielen die Querschnittsstudien neben Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien in den modernen Evidenzsynthese-Methoden eine Rolle. Häufig wird Umweltstatistik in Querschnittsstudien für die Expositionsbestimmung genutzt; so wurden z.B. in einem Scoping Review zum Klimawandel und psychischer Gesundheit 14 Querschnittsstudien eingeschlossen, in die Umweltstatistiken wie z.B. meteorologische Daten eingeflossen sind (Charlson et al. 2021).

Um die Auswirkungen kurzfristiger Erhöhungen einer Exposition gegenüber einem Umweltfaktor zu untersuchen, werden *Zeitreihenanalysen*, *Case-Crossover-Studien* oder *Panel-Studien* durchgeführt. Gerade letztere sind besonders geeignet zur Erforschung physiologischer Vorgänge und Stoffwechselwege. Diese Studien nutzen in der Regel Umweltstatistiken, wie z.B. meteorologische Daten oder Luftschadstoff-Monitoring. So wurden in einer Case-Crossover-Studie zur Auswirkung von Feinstaub und Hitze auf die Mortalität meteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes und die mittleren Tages-Feinstaubkonzentrationen von PM₁₀ für die Expositionsbestimmung genutzt (Georgy et al. 2019).

Schließlich ist die Umweltstatistik für ökologische Studien, die meistens zur Hypothesengenerierung dienen und die Zusammenhänge zwischen dem Risikofaktor und der Gesundheit in aggregierten Daten (z.B. im Vergleich verschiedener Länder) untersuchen, unabdingbar. So wurde in mehreren ökologischen Studien der Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und dem Schweregrad der COVID-19 Erkrankung untersucht (z.B. Pozzer et al. 2020; Prinz und Richter 2022).

2.2 Umweltstatistik und Umweltepidemiologie

Umweltstatistischen Daten nehmen im Kontext der Epidemiologie, Toxikologie, Medizin und den Umwelt- oder auch Sozialwissenschaften eine besondere Rolle ein. Die Umweltstatistik liefert Daten wie z.B. Monitoring-Daten aus nationalen Messnetzen, die bei der Europäischen Umweltagentur (European Environmental Agency, EEA) gebündelt werden. Diese Daten sind eine zentrale Basis für die Bestimmung der menschlichen Exposition gegenüber bestimmten Schadstoffen. In Abb. 4 sind beispielhaft über jeweils ein Jahr gemittelte Feinstaubkonzentrationen (PM_{2.5}) dargestellt. Mit Hilfe dieser umweltstatistischen Informationen auf Basis meist zeitlich oder räumlich bezogener Messungen und Modellierungen wird eine Schätzung der

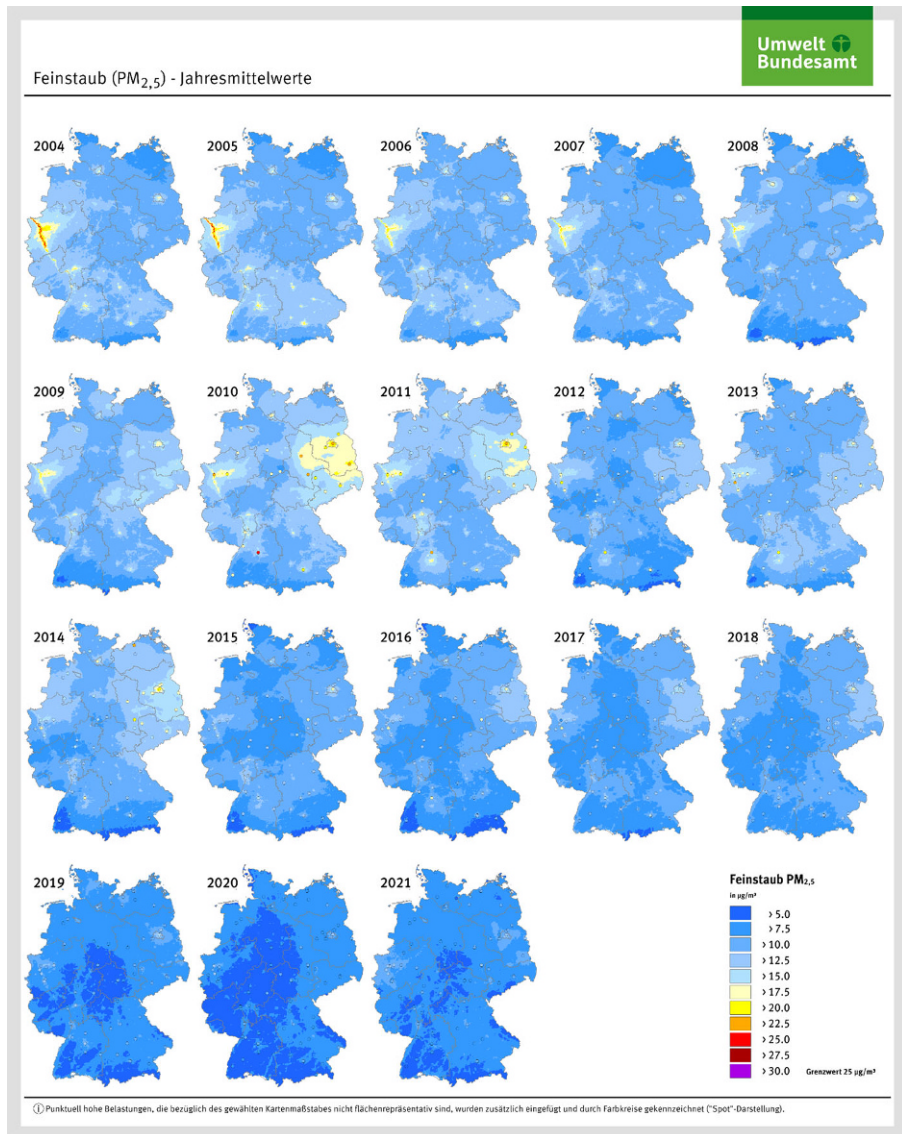


Abb. 4 Feinstaub (PM_{2,5})-Jahresmittelwerte – Konzentrationskarten aus Kombination von Modellrechnungen und Messungen. (Quelle: Umweltbundesamt)

individuellen Exposition gegenüber Umweltstressoren wie Luftschadstoffen und damit die Berechnung der Expositions-Wirkungs-Beziehungen möglich.

Häufig wird die Exposition in epidemiologischen Studien mit Hilfe statistischer Modelle geschätzt, z. B. für die Luftschadstoffe anhand von Landnutzungsmodellen (de Hoogh et al. 2018; Shen et al. 2022), physikalisch-chemischen Modellen wie z. B. Dispersions- und chemischen Transportmodellen (Nonnemacher et al. 2014) oder einer Kombination daraus (van Donkelaar et al. 2019; Hammer et al. 2020).

Dabei variiert die Auflösung verschiedener Modelle zwischen Stunden- und Jahresmitteln bzw. von sehr kleinräumig (punktgenau oder auf wenige Meter genau) bis großräumig (mehrere Kilometer) (Ebel et al. 2007; Nordmann et al. 2020). Umweltdaten können in den Modellierungen während der Entwicklung, der Validierung und/oder der Anwendung genutzt werden (Hennig et al. 2016). Die Daten des Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS) stellen hier Europa- und weltweite Luftschadstoffinformationen auf aktueller Basis zur Verfügung und können in Zukunft noch verstärkt genutzt werden (<https://cds.climate.copernicus.eu>). Neben der Schätzung der Exposition ist es auch möglich, die menschliche Belastung durch Messungen in Humanproben (z.B. PFAS im Blutplasma) individuell zu ermitteln (Röhl und Kolossa-Gehring 2022).

2.3 Health Impact Assessment

Im Rahmen eines quantitativen Health Impact Assessments können gesundheitliche Konsequenzen der (aktuellen) Schadstoffbelastung sowie von Emissions-Reduktions-Maßnahmen (bzw. dem Ausbleiben von Maßnahmen) abgeschätzt werden. Sehr bedeutend in diesem Bereich ist die Global Burden of Diseases, Injuries and Risk Factors Study (Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) 2024), die gesundheitliche Trends weltweit erfasst. Für ein quantitatives Health Impact Assessment sind drei Faktoren erforderlich: der erste Faktor sind die Expositions-Wirkungs-Funktionen, die aus systematischen Übersichtsarbeiten gewonnen werden. Der zweite Faktor im Quantifizierungsprozess ist die Exposition der betrachteten Bevölkerung, beispielsweise die Veränderungen der Luftqualität (d.h. die Differenz zwischen den beobachteten Werten und einem Beurteilungswert, z.B. den neuen WHO-Luftqualitätsleitlinien). Drittens muss die Größe der Bevölkerung, die dieser Veränderung ausgesetzt ist, zusammen mit der Häufigkeit des Auftretens der gesundheitlichen Folgen bestimmt werden. Besonders für politische Entscheidungsprozesse können Health Impact Assessments einen praktischen und interdisziplinären Ansatz darstellen, um die potenziellen Gesundheitsauswirkungen von Maßnahmen in vielfältigen Politikbereichen wie Stadtplanung oder Verkehr zu beurteilen (Linden und Töppich 2021). Für kleinräumige Auswertungen sind hierfür allerdings verlässliche Erhebungs- und Verwaltungsdaten notwendig.

3 Umwelthandeln

Wie bereits erwähnt sieht der Green Deal der EU vor, das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen; bis 2030 sollen die Netto-Emissionen von Treibhausgasen um mindestens 55 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 reduziert werden. Mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes 2021 hat sich Deutschland noch ambitioniertere Ziele gesetzt: Klimaneutralität bis 2045, 65 % Reduktion der Emissionen bis 2030, Überprüfung des Stands der Reduktion in den einzelnen Sektoren von Verkehr bis Landwirtschaft alle zwei Jahre durch einen Expertenrat. Dieses fortlaufende Monitoring berücksichtigt aber nicht die Einstellungen und das Handeln der Bürgerinnen und Bürger. Ob Maßnahmen wie z.B. Förderungen zur Gebäudesanierung,

Installierung von Wärmepumpen, Anschaffung von E-Autos, oder Energieeinsparung Wirkung zeigen, hängt ganz wesentlich auch von den Umwelteinstellungen und dem Verhalten der Bevölkerung ab.

Das Thema Umwelt- und Klimaschutz nimmt zwar nach wie vor einen hohen Stellenwert in der gesellschaftlichen Debatte ein (Gellrich et al. 2021). Werden allerdings die Belastungen im eigenen Portemonnaie spürbar, sinkt die Zustimmung rasch. So ist die CO₂-Bepreisung essentiell für das Gelingen der Energietransformation, stößt aber noch auf eine relativ geringe Akzeptanz in der Bevölkerung. Dabei stellt sich natürlich auch das Problem, dass gerade einkommensschwächere Schichten Mühe haben, den Anstieg der Energiepreise zu tragen. Einen Ausweg bieten CO₂-Steuern mit Pro-Kopf Rückvergütung; diese würden gerade ärmere Haushalte entlasten. Inwieweit diese und andere Maßnahmen der Energiewende Unterstützung finden, kann und sollte mit Surveydaten im zeitlichen Ablauf systematisch untersucht werden. Zudem kann mit den Mikrodaten von Haushalten untersucht werden, wie diese auf Maßnahmen der Umweltpolitik reagieren und sich Einstellungen und Akzeptanz von Befragten im Zeitablauf verändern. Ohne weitreichende Akzeptanz in der Bevölkerung wird die Energiewende kaum gelingen können. Gleiches gilt für zahlreiche andere Maßnahmen der Umweltpolitik, sei es zur Verminderung der Luft- und Gewässerverschmutzung oder zum Schutz der Biodiversität.

Die Beispiele verdeutlichen die Relevanz des individuellen und kollektiven Umwelthandelns und Umweltbewusstseins, das – eingebettet in die konkreten Handlungskontexte – umfassend verstanden werden muss, um politische Zielvorgaben nachhaltig zu erreichen. Gleichzeitig gilt es, auch die Wirkung von (ökonomischen) Handlungsrestriktionen zu verstehen, um sozialen Problemlagen wie Energiearmut effektiv entgegenzuwirken. Substanzielle Erkenntnisse über Umwelthandeln lassen sich maßgeblich aus groß angelegten quantitativen Studien unter Anwendung statistischer Verfahren gewinnen.

Umwelthandeln ist definiert als aktives oder passives Verhalten, das auf die physikalische Umwelt bezogen ist (Ester und Van der Meer 1982). Im Gegensatz dazu wird *Umweltbewusstsein* als die entsprechende subjektive Einstellung verstanden, als „Einsicht in die Gefährdung der natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen durch diesen selbst, verbunden mit der Bereitschaft zur Abhilfe“ (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen 1978). Insgesamt werden mehrere Dimensionen des Umweltbewusstseins unterschieden: Erstens die „Einsicht in die Gefährdung“ als kognitive Komponente, zweitens die „Bereitschaft zur Abhilfe“ als konative Komponente und drittens eine affektive Komponente, die die gefühlsmäßige Einstellung zum Ausdruck bringt. In der Literatur vorgeschlagene Skalen, die auf multiplen Items (z.B. Likertskalen mit Antwortkategorien von „stimme stark zu“ bis „lehne stark ab“) basieren, berücksichtigen in der Regel diese Dimensionen. Beispiele für Skalen zur Messung des Umweltbewusstseins sind Maloney und Ward (1973), Maloney et al. (1975), Dunlap und van Liere (1978), Schahn et al. (1999), die Kurzskala von Diekmann und Preisendörfer (2001) oder die Skala von Kaiser und Lange (2021).

Die theoretische Differenzierung in Umwelthandeln und Umweltbewusstsein erfordert auch getrennte Messungen. Erst dadurch wird es etwa möglich, den Zusammenhang zwischen den beiden Konzepten empirisch zu untersuchen. Wie aber

wird Umwelthandeln gemessen? Hierbei wird grundsätzlich zwischen zwei Konzepten unterschieden. In den sozialwissenschaftlichen Arbeiten zum Umwelthandeln werden meist selbstberichtete Aktivitäten wie Recycling, Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel, Kauf von Bio-Lebensmitteln, Energiesparmaßnahmen im Haushalt etc. erhoben. Man kann hier von „symbolischem“ oder mit Stern (2000) von „intentionalem“ („intent-oriented“) Umwelthandeln sprechen. Anders verhält es sich beim „Impact“-Konzept. Dabei geht es um die Messung der tatsächlichen Auswirkungen von umweltbezogenen Handlungen einer Person auf eine Zielgröße wie CO₂. Zur Erhebung dieses „CO₂-Fußabdrucks“ anhand von Befragungsdaten gibt es mehr oder minder differenzierte Verfahren (Notter et al. 2013; Bruderer Enzler und Diekmann 2019; Hadler et al. 2022). Hier ist Vorsicht geboten, denn nicht alle Bilanzrechner sind validiert und differenziert genug, um auch nur näherungsweise verlässliche Schätzungen zu ermöglichen. In der Regel werden die Bereiche Wohnen, Mobilität, Ernährung, Kleidung, sonstiger Konsum erfasst, wobei z. B. Wohnungsgröße und Heizung, Autonutzung, Flüge etc. besonders stark zur CO₂-Bilanz beitragen. Umwelthandeln als Impact-Größe ist entsprechend auch stärker mit dem Einkommen korreliert als intentionales Umwelthandeln (Bruderer Enzler und Diekmann 2019). Geht es um die Untersuchung der Wirkung umweltpolitischer Maßnahmen, empfiehlt es sich, Umwelthandeln als Impact-Größe zu berücksichtigen. Wünschenswert wäre der Vergleich, die Prüfung, Validierung und Weiterentwicklung von Methoden, mit denen die CO₂- oder Greenhouse Gas-Emissionen von Haushalten anhand von Befragungsdaten relativ verlässlich und auf praktikable Weise erhoben werden können.

Sowohl die Gegenüberstellung der Begrifflichkeiten als auch die Erläuterungen zu Unterschieden in der Messung von Umweltbewusstsein und Umwelthandeln verdeutlichen die Wichtigkeit von Studien, die empirische Zusammenhänge zwischen diesen beiden Konstrukten untersuchen. Die Stärke des Zusammenhangs wurde dabei in zahlreichen Studien anhand von Surveydaten geschätzt. Metaanalysen von Hines et al. (1987) und Bamberg und Möser (2007) weisen auf eine moderate Stärke der Korrelation hin, die oft kausal gedeutet wird. Ob, unter welchen Bedingungen und in welchem Ausmaß Umweltbewusstsein das individuelle Umwelthandeln beeinflusst, bleibt aber kontrovers. Eine aktuelle Studie kommt mit der statistischen Fixed-Effects-Modellierung von Paneldaten zu einem negativen Ergebnis (Andersen und Mayerl 2022). Sowohl beim Konsumverhalten als auch bei der Mobilität ist kein signifikanter Effekt des Umweltbewusstseins auf das Verhalten nachweisbar. Diekmann und Preisendörfer (2003) argumentieren, dass allenfalls in „Low-Cost-Situationen“ Umweltbewusstsein in ein entsprechendes Verhalten umgesetzt wird. Studien aus dem Konsumbereich zeigen beispielsweise, dass die Conscientiousness for Sustainable Consumption (CSC), also das Bewusstsein für nachhaltigen Konsum, einen positiven Einfluss auf die Kaufintention von nachhaltigen Produkten hat (Balderjahn et al. 2015), die Kaufintention jedoch nicht zwangsläufig auch in ein entsprechendes Kaufverhalten mündet (sog. Attitude-Behaviour-Gap (Carrington et al. 2010)).

Wenn Umweltbewusstsein auch das individuelle Umwelthandeln nur in geringem Maße kausal beeinflussen dürfte, so ist es doch sehr bedeutsam für die Akzeptanz von Maßnahmen der Umweltpolitik. Für die Umweltpolitik ist es wichtig, den Grad

der Zustimmung zu Maßnahmen wie CO₂-Steuer, Förderung von E-Autos, der energetischen Sanierung von Gebäuden etc. regelmäßig zu erheben. Die Ariadne-Studie (Levi et al. 2021) kommt dabei zu dem Ergebnis, dass im Verkehrsbereich „Pull-Maßnahmen“ (z. B. der Ausbau von Radwegen oder die Förderung des ÖPNV) populärer sind als „Push-Maßnahmen“ (z. B. eine CO₂-Steuer oder Road-Pricing); nur haben gerade letztere Maßnahmen einen sehr viel stärkeren Effekt auf die CO₂-Reduktion als erstere. Ein wichtiges Thema ist auch, ob Informationen und die Art der Fragestellung die Akzeptanz von Umweltmaßnahmen beeinflussen. So hat man sich erhofft, dass ausführliche Informationen z. B. über CO₂-Abgaben deren Akzeptanz erhöhen würden. In mehreren Surveyexperimenten wurde der Frageframe entsprechend variiert. Eine Studie von Bernauer und McGrath (2016) kommt allerdings zu dem Resultat, dass anders als erwartet, der Frageframe kaum einen Einfluss auf die Akzeptanz von Maßnahmen ausübt.

Neben Daten der physikalischen Umwelt erfordern Umwelt- und Klimapolitik valide Angaben zur subjektiven Einstellung der Bürgerinnen und Bürger, die durch ihre Handlungen Umwelt, Klima und politische Maßnahmen beeinflussen. Umgekehrt wirken sich Umwelt- und Klimapolitik, beispielsweise die CO₂-Bepreisung, auf das Handeln der Menschen aus, etwa im Bereich von Konsum, Wohnen oder Mobilität. Wie die Menschen über Umwelt und Umweltpolitik denken, in welchem Ausmaß und unter welchen Bedingungen sie ökologisch handeln, ob sie umweltpolitische Maßnahmen akzeptieren oder missbilligen, ist schon seit langem Gegenstand sozialwissenschaftlicher Umweltforschung. In der Regel werden die Daten mittels Surveys erhoben; zur Messung von Umweltbewusstsein und -sorgen, ökologischen Handelns und der Akzeptanz von Umweltpolitik wurden eine Reihe von Skalen (Itembatteri-

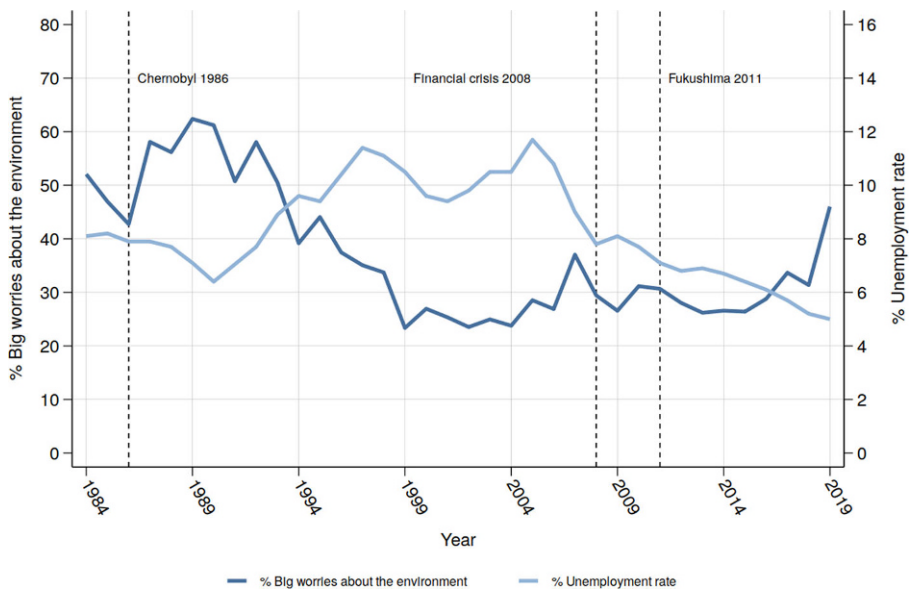


Abb. 5 Entwicklung der Umweltsorgen der deutschen Bevölkerung und der Arbeitslosenquote seit 1984. (Datenbasis: Sozio-oekonomisches Panel; Quelle: Hartmann und Preisendörfer 2021, S. 327, Fig. 2)

en) entwickelt. Beispielsweise werden mit dem Sozio-oekonomischen Panel (SOEP) bereits seit 1984 wiederholt die Umweltsorgen der deutschen Bevölkerung erfasst (siehe Abb. 5). Die Abbildung zeigt gegenläufige Entwicklungstendenzen zwischen Arbeitslosigkeit und Umweltsorgen auf der Aggregatebene. Details sind Hartmann und Preisendörfer (2021) zu entnehmen. Die Daten beziehen sich auf Individuen oder Haushalte, werden im Querschnitt oder auch als Paneldaten erhoben und sind als Mikrodaten besonders aussagekräftig, wenn man einzelne Untergruppen vergleichen oder Zusammenhänge analysieren möchte. Für die Analyse von Auswirkungen der Umweltpolitik und ihre Evaluierung sind solche Daten unentbehrlich. Paneldaten auf der Basis einer größeren Zufallsstichprobe aus der Bevölkerung würden ein kontinuierliches Monitoring der Umwelt- und Klimapolitik sowohl bezüglich des Umwelthandelns auf der Mikroebene von Haushalten und Personen als auch bezüglich der subjektiven Einstellung („Umweltbewusstsein“) und der Akzeptanz politischer Maßnahmen ermöglichen. Dies wiederum würde zur Beschleunigung umweltpolitischer Entscheidungen beitragen. Mit dem von der DFG geförderten German Longitudinal Environmental Survey (GLEN, <https://glen-studie.de>) startete kürzlich eine umfassende bundesweite Panelerhebung zur CO₂-Bilanz von Haushalten, sowie zum Umweltverhalten, den Umwelteinstellungen, dem Konsumverhalten, Wohnen, Mobilität und Ernährung von etwa 20.000 Personen. Ergänzt um Survey-Experimente und geo-referenzierte Daten wird die GLEN-Studie eine innovative und bundesweit einzigartige Datengrundlage für die sozialwissenschaftliche Umweltforschung bereitstellen.

4 Ökosysteme

Ökosysteme sind als „dynamischer Komplex von Gemeinschaften aus Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen sowie deren nicht lebender Umwelt, die als funktionelle Einheit in Wechselwirkung stehen“ definiert (United Nations 1992). Sie erbringen eine Vielzahl von *Leistungen für den Menschen*, z. B. durch die Bereitstellung von Nahrungsmitteln, Feinstaubfilterung und Kohlenstoffspeicherung oder die Möglichkeit zu naturnahem Tourismus (für umfangreiche Referenzlisten von Ökosystemleistungen siehe United Nations et al. 2021, S. 131; oder Haines-Young und Potschin 2018). All diese Leistungen sind für die Gesellschaft und die Wirtschaft wertvoll, werden jedoch durch traditionelle statistische Berichtssysteme, insbesondere die Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen, nur teilweise und indirekt erfasst bzw. den Ökosystemen nicht explizit zugeschrieben.

Ökosystemrechnungen füllen diese Lücke und geben den Leistungen der Natur durch ihre Quantifizierung einen Stellenwert. Damit können die Ergebnisse der Ökosystemrechnungen in die politische und wirtschaftliche Entscheidungsfindung eingebunden werden, die breite Öffentlichkeit ansprechen, sowie eine Grundlage für wissenschaftliche Analysen bieten. Die Erfassung der Ökosystemleistungen ist ein weiterer neuer Teil der bereits etablierten Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR), welche die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Ökonomie, wie z. B. Umweltbelastungen durch die Wirtschaft, Erträge von Naturressourcen und den Wert von Umweltschutzmaßnahmen abbilden.

Im März 2021 hat die Statistische Kommission der Vereinten Nationen beschlossen, die Kapitel eins bis sieben des System of Environmental Economic Accounting-Ecosystem Accounting (SEEA-EA) als statistischen Standard zu bestätigen, weitere Kapitel des Rahmenwerks zur monetären Bewertung von Ökosystemleistungen und Ökosystemkapital (Assets) sind als Leitfaden beigelegt. Dieses anerkannte Rahmenwerk definiert nun die Struktur und die Accounting-Methoden des Berichtssystems (United Nations et al. 2021). Zudem hat die EU über eine Änderung der Verordnung (EU) ein Berichtsmodul für das Ecosystem Accounting eingeführt, das weitgehend auf dem SEEA-EA beruht, die konkrete Implementierung für den europäischen Kontext definiert und die Ergebnisse vergleichbar macht (EU Verordnung 691/2011).

Die Ökosystemrechnungen sind in Konten aufgebaut, die Fläche (Extent), Zustand (Condition) und Leistungen (Services; physisch und monetär) in Bilanzform darstellen. Das heißt, der Inhalt dieser Konten wird dreijährlich (bzw. jährlich für Leistungskonten) als Zeitreihe auf vergleichbaren Aggregationseinheiten (Bund, Länder, Gemeinden) mit Anfangs- und Endbestand sowie Veränderung berichtet. Fläche und Zustand bilden als Bestandsgrößen die Grundlage, um die Flussgrößen – die Ökosystemleistungen – abzuleiten. Der systemische Ansatz der Konten erlaubt zudem, Angebot und Nachfrage an Ökosystemleistungen über die Zeit zu interpretieren, indem Informationen zum Ausmaß (z.B. zu renaturierten Flächen) und Zustand (z.B. Dürre) zu Rate gezogen werden. Somit soll die Interaktion zwischen Mensch und Natur inklusive Rückkopplungseffekten und Kipppunkten umfassend abgebildet werden.

Gespeist werden die Konten der Ökosystemrechnungen durch eine Vielzahl von Datensätzen aus der Fernerkundung, Katastern sowie ökologischen Kartierungen und Monitoringsystemen. Eine Besonderheit und Grundbedingung dabei ist die explizit räumliche Struktur der Daten – und damit der Rechengrundlage – sowie deren zeitliche Konsistenz. Somit werden bundesweit alle Flächen als Ökosysteme mit einbezogen und die statistischen Ergebnisse nicht nur als Tabellenkonten, sondern auch als Karten darstellbar (siehe Abb. 6).

Am Statistischen Bundesamt werden die Ökosystemrechnungen derzeit aufgebaut (für methodische Berichte zur Flächen- und Zustandsbilanz siehe Statistisches Bundesamt 2021a, b). Dabei kann auf eine Vielzahl von Erfahrungen und Pilotprojekten (Syrbe et al. 2018; Grunewald et al. 2020) sowie auf die Fachexpertise aus Forschung und anderen Behörden zurückgegriffen werden. Für die Flächen- und Zustandsbilanzen werden die Ergebnisse auf destatis.de/ugr sowie in der Online-Kartenanwendung „Ökosystematlas“ (oekosystematlas-ugr.destatis.de) angeboten. Die Bilanzen ausgewählter Ökosystemleistungen werden sukzessive ab dem Jahr 2025 veröffentlicht, zunächst startend mit den Ökosystemleistungen Feinstaubfilterung, Kohlenstoffsequestrierung und -speicherung, Kühlung in Städten, Naturnaher Tourismus, Bereitstellung von Kulturpflanzen und Holzzuwachs.

4.1 Beispiel Ökosystemleistung „Lokale Klimaregulierung“

Jede Ökosystemleistung wird, basierend auf Flächen- und Zustandsdaten, separat modelliert und berechnet. Anhand der Leistung „Kühlung in Städten durch Vege-



Abb. 6 Karte der Ökosysteme basierend auf der Flächenbilanz der Ökosysteme. (Statistisches Bundesamt 2023)

tation“, auch als lokale Klimaregulierung bezeichnet, lässt sich dieser Prozess gut verdeutlichen.

Urbane Grünflächen stellen dem Menschen an heißen Tagen eine regulierende Kühlleistung bereit, die Wohlbefinden steigert und gesundheitliche Vorteile bringt. Städtische Vegetation wie Baumreihen, Parks oder Dachbegrünungen tragen durch Schattenwurf und Verdunstung dazu bei Spitzentemperaturen und Hitzeinseln abzumildern (Venter et al. 2020; Marando et al. 2022). Durch die steigende Wahrscheinlichkeit für Hitzewellen in Europa (Christidis et al. 2015) und deren drastische Gesundheitsfolgen (Lüthi et al. 2023; Yang et al. 2024) gewinnt diese Ökosystemleistung zunehmend an Bedeutung.

Um die Kühlleistung von urbanen Grünflächen zu quantifizieren, gibt es verschiedene Ansätze, wobei in der Regel ausgehend vom Status Quo ein Szenario mit weniger/ohne oder zusätzlicher Begrünung simuliert wird. Dies kann kalibrierte Baumkronenmodelle wie iTree (Semenzato und Bortolini 2023) und WRF-UCM (Loughner et al. 2012), Stadtklimamodelle wie Palm4U (Anders et al. 2023) und MUKLIMO (Žuvela-Aloise et al. 2016) oder regressionsbasiert (Venter et al. 2020; Marando et al. 2022) umgesetzt werden. Zunehmend werden in diesen Stadtklimamodellen auch Local Climate Zones (LCZs) (Huang et al. 2023) differenziert, um Hitzeinseln in urbanen Landschaften ganzheitlich im Hinblick auf Bebauungsstruktur, Versiegelung und Vegetation zu analysieren (Rahmani und Sharifi 2025). Stadtklimamodelle und LCZs ermöglichen durch ihren hohen Detailgrad eine Analyse von verschiedensten baulichen oder stadtplanerischen Maßnahmen, sind in ihrer Umsetzung aber auch komplexer und datenintensiver. Die Herausforderung beim Aufbau von regelmäßigen nationalen sowie EU-weiten Ökosystemrechnungen liegt, vor allem zu Beginn, darin, eine wissenschaftlich solide, jedoch einfach umzusetzende Methode auszuwählen. Diese sollte der Accounting Logik der internationalen statistischen Standards SEEA-EA folgen, die vorsieht, dass die Leistung des Status Quo der Ökosysteme mit einem Kontrafaktum verglichen wird (in diesem Fall mit einem lokalen Szenario ohne Vegetation). Die Methode sollte zudem international vergleichbar (d.h. alle EU-Mitgliedsstaaten sollen sie bei Eintreten der europäischen Berichtspflichten mit verfügbaren Daten umsetzen können) sowie jährlich und flächendeckend umsetzbar sein. Aus diesem Grund wurde durch Eurostat ein Regressionsmodell wie in Marando et al. (2022) vorgeschrieben, welches jedoch an den nationalen Kontext angepasst werden kann.

Die Berechnung der Ökosystemleistung lokale Klimaregulierung mit diesem Modell verdeutlicht, wie die Konten der Ökosystemrechnungen in Verbindung funktionieren. Zunächst werden urbane Gebiete nach der einheitlichen EU-weiten Methodik (DEGURBA) bestimmt (Europäische Kommission et al. 2021) und aus der Flächenbilanz der Ökosysteme als Geodaten extrahiert, um die Analyseeinheit für die Leistungsberechnung zu definieren. Insgesamt enthält die Flächenbilanz Informationen zu 74 Ökosystemklassen⁶, die bei der Erstellung der Flächenbilanz anhand

⁶ Basierend auf der Corine Land Cover (CLC) Klassifikation und nationalen Forschungsprojekten (Grunewald et al. 2020) wurde eine Klassifikation erstellt, die Landnutzung und -bedeckung detailliert differenziert, für die Biodiversität besonders relevante Ökosysteme ausweist (Streuobstwiesen, Feldhecken, Wattflächen), sowie Ökosystemtypen identifiziert, die besonders relevant für die Erbringung von Ökosystemleistungen sind (Feuchtgebiete, urbane Grünflächen).

von Satellitendaten, Liegenschaftskatastern und Biotopkartierungen identifiziert und durch einen Algorithmus klassifiziert werden (siehe Abb. 6). Informationen zu den Methoden der Flächenbilanz und detaillierte Steckbriefe zu allen Ökosystemtypen finden sich im Methodenbericht der Flächenbilanz (Statistisches Bundesamt 2023).

Um die Kühlkapazitäten dieser urbanen Grünflächen abschätzen zu können, werden aus der Zustandsbilanz geo-referenzierte Informationen zu genau diesen Flächen entnommen. Die Zustandsbilanz beschreibt den Zustand aller Ökosystemtypen anhand spezifisch für sie ausgewählten Variablen (abiotisch, biotisch, landschaftlich, Belastungen). Diese sollen die Integrität des Ökosystems widerspiegeln und als Grundlage für Leistungsberechnungen dienen. Für die lokale Klimaregulierung sind beispielsweise die Kronendichte zum Identifizieren von Bäumen, der Vegetationsindex NDVI zum Erkennen von Stadtgrün, Verdunstung (Transpiration plus Interzeption) sowie eine Reihe von Kontrollvariablen (Baudichte, Versiegelung) miteinbezogen worden.

Zur Leistungsberechnung wird auf den urbanen Grünflächen per linearer Regression auf einer räumlichen Auflösung von 100×100 m Zellen die funktionale Abhängigkeit der Lufttemperatur in den Sommermonaten Juli und August von der Vegetation und anderen Einflussgrößen geschätzt.⁷ Durch das geschätzte Modell kann dann die Temperatur im hypothetischen Fall ohne das Vorhandensein von Vegetation in und um die jeweilige Zelle simuliert werden. Die Differenz zwischen gemessener Temperatur mit Vegetation und jener simulierten ohne Vegetation stellt die lokale Kühlleistung dar. Durch die räumlich hochaufgelösten Eingangsdaten kann diese Berechnung kleinräumig und dadurch präziser durchgeführt werden. Die physische Kühlleistung wird in Grad Celsius tabelliert und auf verschiedenen administrativen Ebenen ausgewiesen (Angebot). In Verbindung mit Landnutzungsinformationen und räumlich hochaufgelösten Bevölkerungsdaten kann auch die dadurch erfüllte Nachfrage quantifiziert werden (Nutzung).

Perspektivisch wird auch geprüft, ob eine Erweiterung oder Umstellung von linearen Modellen zu differenzierteren Stadtklimamodellen und LCZs umsetzbar ist, ohne die internationale Vergleichbarkeit einzuschränken. Die automatische Produktion der Ökosystemrechnungskonten erlaubt hier gegebenenfalls eine effiziente Revision der Zeitreihen, wenn neue Datenquellen (beispielsweise aus der Fernerkundung) oder Methoden verfügbar sind.

4.2 Herausforderungen und Möglichkeiten

Als neues Berichtssystem, das sich in vielen Ländern erst im Aufbau befindet, stehen den Statistikerinnen und Statistikern aus Wissenschaft und Praxis noch Herausforderungen gegenüber.

Eine zentrale Herausforderung ist die Datenverfügbarkeit, siehe auch Kapitel 6. Die Ökosystemrechnungen werden im Idealfall durch eine Vielzahl qualitätsgeprüfter Datensätze gespeist, die zeitlich und räumlich möglichst hochauflösend, in sich

⁷ Die zeitliche Dimension des Ansatzes (Sommermonate) ist derzeit durch die Verfügbarkeit von räumlich hochaufgelösten Daten zur Oberflächentemperatur bedingt. Somit ist es derzeit noch nicht möglich, die besonders relevante Kühlungsleistung an expliziten Hitzetagen zur isolieren.

homogen, sowie über die Zeit konsistent und dauerhaft verfügbar sind. Der bundesweite Ansatz der Ökosystemrechnungen bedeutet, dass das Berichtssystem von einer gut funktionierenden Datenbereitstellung im föderalen System profitieren würde. Derzeit sind z. B. Daten zu Oberflächengewässern und Biotopkartierungen nicht bundesweit einheitlich und in hoher Detailtiefe verfügbar. Die rapide Entwicklung im Bereich Fernerkundung ist eine große Chance für die Ökosystemrechnungen. Dabei wäre es wünschenswert, wenn von internationalen und nationalen Institutionen qualitätsgeprüfte, nutzungsbereite und teils maßgeschneiderte Datenprodukte in noch höherem Maße bereitgestellt und deren Fortschreibung langfristig gewährleistet würden.

Der letzte Aspekt betrifft auch einen der großen funktionalen Vorteile des Kontensystems der Ökosystemrechnungen. Die einheitlichen räumlichen Analyseeinheiten und die klare Accounting-Struktur ermöglichen es, einen Großteil der Konten automatisiert zu erstellen. Dadurch können neue oder aktualisierte Eingangsdaten schnell integriert werden sowie der Ressourcenaufwand bei der Berechnung weiterer Zeitschritte geringgehalten werden. Die in sich geschlossenen, aber miteinander verbundenen Konten erlauben es zudem, im Sinne einer Datenautobahn verschiedene „Produktausfahrten“ zu nehmen. So können Ergebnisse der einzelnen Konten, thematische Auswertungen, Berechnungen von Nachhaltigkeitsindikatoren und Visualisierungen in Kartenform als „Beiprodukte“ nebst der Erfassung von Ökosystemleistungen erstellt werden.

Eine weitere Herausforderung stellt die monetäre Bewertung der Ökosystemleistungen dar, zu der konzeptionell und methodisch noch kein breiter Konsens erreicht wurde. Folglich sind die Kapitel des SEEA-EA, welche die monetäre Bewertung behandeln, nur als Leitfaden, nicht aber als statistischer Standard anerkannt. Ökonomische Werte entstammen der Knappheit von Leistungen. Das heißt, dort wo die Natur besonders viel physische Leistung erbringt, ist der Wert möglicherweise am niedrigsten. Zudem ist die Bewertung zu Marktpreisen oft nicht möglich beziehungsweise empfindlich gegenüber Marktstrukturen, externen Preisschwankungen und politischen Interventionen. Hierdurch mögliche Fehlinterpretationen monetärer Werte gilt es zu vermeiden, durch eine transparente und im ökologischen und ökonomischen Kontext eingebettete Kommunikation der Daten. Zudem stellt die Wissenschaft mitunter mehrere Bewertungsmethoden für dieselben Leistungen zur Verfügung. Hier wird eine Priorisierung beziehungsweise eine wissenschaftlich basierte „Best Practice“ benötigt.

4.3 Potenzielle Anwendungen

Ökosystemrechnungen sind die potenzielle Quelle einer Vielzahl von Datenprodukten, die dementsprechend vielschichtig, u. a. auch für weiterführende statistische Modellierungen, einsetzbar sind. International können die Ökosystemkonten länderübergreifend vergleichbare Informationen liefern, die beispielsweise einer gemeinsamen Umweltpolitik der Europäischen Union zugutekommen. Zusätzliche Indikatoren aus dem Ecosystem Accounting können in internationale und nationale Nachhaltigkeits- und Biodiversitätsstrategien (Vereinte Nationen 2017; CBD 2022;

BMUKN 2024) sowie nachhaltige Unternehmensberichterstattung (EU Richtlinie 2022/2464) integriert werden.

Ähnlich der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen kann das Kontensystem auf der Makroebene als Werkzeug im Sinne einer Input-Output-Analyse verwendet werden, also den ökologischen Gegenpart zur Darstellung wirtschaftlicher Produktionszusammenhänge darstellen. Ebenso können politische und gesellschaftliche Entscheidungen durch regionale Daten gestützt werden, zum Beispiel zur Degradation oder Renaturierung von Ökosystemen.

Ein Open Data Angebot zu räumlichen Zeitreihendaten zu Ökosystemen positioniert die Ökosystemrechnungen als Input für die Wissenschaft (Maßnahmenevaluierung, Modellierung von Zukunftsszenarien). Die Visualisierung in Kartenform ermöglicht zudem eine leicht verständliche Kommunikation der Ergebnisse an die breite Öffentlichkeit.

5 Klimawandel

Das Phänomen Klimawandel wirft viele Sachfragen auf, deren Beantwortung inklusive Quantifizierung der jeweiligen Unsicherheiten moderner und teils neuer statistischer Methoden bedarf. Da die relevanten Systemvariablen über die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen räumlich-zeitlich zusammenhängen, ist die Erfassung und Modellierung der Abhängigkeiten ein zentrales Problem. Neben der Detektion der Veränderung von Klima-Mittelwerten, wie jahres-/tageszeitlich und regional aufgeschlüsselten Mittelwerten von Temperatur, Niederschlag oder Wind in der Atmosphäre, aber auch entsprechenden physikalischen Größen in Ozeanen, der Landoberflächen oder der polaren bzw. hochgebirgigen Eisverteilungen, sind Änderungen an deren Variabilität und Kovariabilität (z. B. ob sich der Niederschlag gleichmäßig über einen Monat verteilt, oder ob es vermehrt oder längere Dürre- bzw. Regenperioden gibt, und wie sich ozeanische Temperaturänderungen auf Variationen der Niederschläge über den Kontinenten auswirken) ein wesentlicher Aspekt der Forschung zum Klimawandel.

In den letzten Jahren werden verstärkt die Tendenzen der Häufigkeit und der Intensität extremer Wetterereignisse wie Starkregen, Sturm oder Hitzewellen untersucht. Die Analyse vergangener Extremereignisse, die Beschreibung der dabei ablaufenden physikalischen Prozesse in Atmosphäre und Ozean, und deren Modellierung liefern wichtige Hinweise für notwendige Anpassungen der sozio-ökonomischen Systeme. Dabei spielen zeitlich befristet geförderte Forschungsverbünde wie *ClimXtreme* (ClimXtreme 2020) eine zentrale Rolle für die Forschung, in denen in interdisziplinär aufgestellten Arbeitsgruppen moderne statistische Forschung mit der physikalisch-chemischen Prozessanalyse verbunden wird. Zur Erhöhung der Datenbasis werden dabei gerne Daten verschiedener Orte kombiniert, was Fragen der Vergleichbarkeit der Orte und des Mehrwerts der gemeinsamen Analyse aufwirft. Statistische Homogenitätstests liefern hierfür wichtige Hinweise, und Penalisierungstechniken erlauben gemeinsame Analysen unter Berücksichtigung eines gewissen Grades an Heterogenität (z. B. Lilienthal et al. 2022; Bücher und Zanger 2023, Zanger et al. 2024). Allgemeine Literatur mit Lehrbuchcharakter zum Themenbereich Statistik

und Klima, Statistik in der Meteorologie, Geostatistik, die in vielen Publikationen sowie zur universitären Ausbildung genutzt werden sind z. B. von Storch und Zwiers (2002), Wilks (2019), Chiles und Delfiner (2012), Wackernagel (2010) oder Cressie und Wikle (2011).

Über die reine Beschreibung der Phänomene und deren Änderungen in Zeit und Raum hinaus stellt sich die sogenannte Attributionsforschung der Aufgabe, den von Menschen verursachten Anteil dieser Änderungen zu bestimmen, auch um entsprechende Anpassungs- und Gegenmaßnahmen ergreifen und damit natürliche und anthropogene Systeme resilienter machen zu können. Zur Beantwortung dieser Fragen zur Kausalität (Pearl 2000) stehen oft nur recht kurze Datenreihen zur Verfügung, so dass die Analyse einer Kombination physikalischer und statistischer Modelle unter Berücksichtigung zahlreicher Unsicherheiten aus unterschiedlichen Quellen bedarf. Die in ClimXtreme weiterentwickelten Homogenitätstests lieferten wichtige Informationen zur Attribution der katastrophalen Starkregenereignisse im Juli 2021 in den Einzugsgebieten der Flüsse Ruhr, Ahr, Erft, Rur und Maas (Tradowsky et al. 2023).

Die Probleme kurzer und ggf. inhomogener Datenreihen werden durch sogenannte Reanalysen (Bengtsson und Shukla 1988; Balmaseda et al. 2013; Hersbach et al. 2020, weitere Details siehe <https://reanalyses.org/>) zwar nicht vollständig vermieden, aber zumindest stark reduziert. Reanalysen führen Daten unterschiedlicher Beobachtungssysteme der Atmosphäre und des Ozeans und numerisch-physikalische Modelle nach einem Optimalitätsverfahren zusammen und homogenisieren so weitgehend meteorologisch – ozeanographisch – klimatologische Beobachtungen in Raum und Zeit. Gängige Reanalysen z. B. der Atmosphäre decken das komplette Volumen zwischen Erdoberfläche und ca. 80 km Höhe mit mehr als 100 Schichten und horizontalen Gittermaschenweiten von 30 km in stündlicher Auflösung bereits seit dem Jahr 1940 ab.

Das gesellschaftliche Interesse an Klimafragen hat sich seit der Ersten Weltklimakonferenz (World Climate Conference WCC 1: 12.–23. Februar 1979) massiv gesteigert. Ein wesentliches Ergebnis dieser internationalen Konferenz war die Gründung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) durch die World Meteorological Organization (WMO) und das United Nations Environmental Programme UNEP im Jahr 1988. Das IPCC führt keine eigene, originäre Forschung zu Klima und Klimawandel durch, sondern kompiliert und evaluiert die entsprechenden Originalpublikationen in Form von Metastudien. Durch diese werden dann die Regierungen der Mitgliedstaaten über das gegenwärtige Wissen zum Klimawandel informiert. Die Sachstandsberichte (Assessment Reports AR) erscheinen seit dem ersten Bericht 1990 regelmäßig etwa alle fünf bis sieben Jahre. 2021/22 wurde der sechste Sachstandsbericht der Öffentlichkeit vorgestellt (IPCC 2022), im August 2023 wurde der siebte Zyklus initiiert. Jeder AR ist in drei Teile untergliedert, die wiederum diverse Kapitel zu ausgewählten Themenbereichen enthalten. Jedes Kapitel wird durch koordinierende Leitautoren, Leitautoren und beitragende Autoren erstellt und anschließend einem umfangreichen und detaillierten Begutachtungsprozess unterworfen. Jedes Kapitel enthält eine umfangreiche Referenzenliste der originären Veröffentlichungen, die in dem jeweiligen Kapitel zusammengefasst werden und die zu den dann im AR veröffentlichten Schlussfolgerungen führen.

Ergänzt werden die AR durch die Special und Methodology Reports (SR, MR) zu ausgewählten, transdisziplinären Fragestellungen wie etwa den meteorologischen Extremereignissen. Alle IPCC Reports seit 1990 (AR, SR und MR) sind als pdf-downloads über die Internetseite des IPCC (<https://www.ipcc.ch/reports>) einzusehen. Alle Berichte enthalten umfangreiche und teilweise sehr detaillierte Bezüge zu statistischen Fragestellungen, Modellen und Methoden. Diese volle Komplexität über den Verlauf der letzten 35 Jahre kann hier nicht annähernd dargestellt werden, weshalb ausgewählte Stichpunkte zur Fragestellung Klimawandel und Statistik aus dem sechsten Sachstandsbericht im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

5.1 Der sechste IPCC Sachstandsbericht AR6

Viele Experten aus den Mitgliedstaaten des IPCC haben an drei großen Teil-Reports der sogenannten Arbeitsgruppen (Working Group WG I, II und III) des AR6 mit je etwa 2500 Seiten teilgenommen. Im März 2023 wurde dann als vierter Berichtsteil der Synthese Report (IPCC 2023) veröffentlicht, der die Ergebnisse der drei Einzelteile zusammenfasst, um dem Ziel der Unterrichtung der Regierungen der Mitgliedsstaaten über den Stand der Forschung zum globalen Klimawandel gerecht zu werden.

Alle Beiträge zum AR6 durchliefen mehrere Review- und Qualitätssicherungsrunden und enthalten sehr ausführliche Referenzlisten. Die Grafiken sind geprüft und frei nutzbar. Man hat im Rahmen des IPCC Prozesses beginnend mit dem vierten Sachstandsbericht auch eine einheitliche Fachsprache bzw. ein gemeinsames Vokabular bezüglich statistischer Fragestellungen entwickelt. So wurden für statistische Hypothesentests Richtlinien zur Inferenz und eine gewisse Einheitlichkeit für Aussagen zur Signifikanz festgelegt. Die drei Teilberichte der Arbeitsgruppen WG I, II und III und der Synthese Report enthalten auch umfassende „Summaries for Policy Makers“, die für diesen Beitrag zur Statistik und Klimawandel zentral sind.

Die Working Groups behandeln jeweils getrennt drei Themengruppen: Physikalisch-chemische Aspekte natürlicher und anthropogener Klimavariationen in Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre und Landoberflächen in ihren globalen und regionalen Ausprägungen (WG I), Auswirkungen von Klimavariationen auf sozio-ökonomische Systeme, deren Vulnerabilitäten und die möglichen Anpassungsmaßnahmen (WG II) und mögliche Wege zur Vermeidung bzw. Milderung anthropogener Klimaänderungen (WG III).

Allen drei Working Groups gemeinsam ist die Betrachtung eines weiten Spektrums räumlicher Erstreckungen (Skalen), die von km-Skalen z.B. für Städte im Klimawandel bis zur globalen Skala (>10000km) z.B. für das globale Mittel der bodennahen Lufttemperatur der Atmosphäre als Leitindikator des Klimawandels reicht. Alle drei Working Groups verwenden in unterschiedlichen Ausprägungen statistische Modelle und Verfahren. Diese umfangreichen, durch den Begutachtungsprozess abgesicherten Erkenntnisse der IPCC Sachstandsberichte und die sich daraus ergebenden Forderungen zur Umsetzung sollten auch für weitere Fragen im Rahmen von Statistik und Klimawandel berücksichtigt und behandelt werden. Weiterführende statistische Modellierungen und Methoden sollten über transdisziplinäre Veröffentlichungen in zukünftige Sachstandsberichte einfließen.

In der ersten Working Group *Physikalisch-chemische Aspekte im Klimawandel* geht es vor allem um folgende Fragestellungen: Können auf Basis der vorliegenden Beobachtungen in Atmosphäre, Ozean und Kryosphäre überhaupt statistisch verlässliche Anzeichen für grundlegende, globale und regionale Klimaveränderungen festgestellt werden? Statistisch signifikante Veränderungen und Assoziationen klären nicht, welche realen, externen Effekte anthropogener oder natürlicher Art zum Klimawandel zwingend kausal sind. Dies bedarf komplexer Klimasimulationen, bei denen die jeweiligen externen Antriebsfaktoren einzeln oder in Kombinationen vorgeschrieben werden. Alle physikalisch-chemisch orientierten Klimamodelle umfassen die Klimasubsysteme Atmosphäre, Ozean, Meer-/Inlandeis und Landoberflächen durch mathematisch numerische Beschreibungen von Erhaltungsgrößen wie Energie, Massen und Drehimpuls. In der diskreten Ausprägung für Computermodele sind diese Beschreibungen äquivalent zur Flussrechnung der Zustandsgrößen, die dann die globalen und regionalen Kreisläufe von Energie, Drehimpuls, Wasser, Kohlenstoff etc. durch die Klimasubsysteme quantitativ in Raum und Zeit erfassen. Die Zuordnung kann dann als ein statistisches (Bayes-)Entscheidungsproblem (Min et al. 2004) formuliert werden. Alle eingehenden Daten der Beobachtungen und Simulationen haben ihre inhärenten, teilweise unvermeidbaren Unsicherheiten, die entsprechend erfasst bzw. modelliert werden. Zentrale Methode ist das „optimal fingerprinting“, ein Regressionsverfahren, bei dem im Sinne von Ordinary Least Squares (OLS) die räumlich-zeitlichen Klimaänderungsmuster der Simulationen gegen die entsprechenden Beobachtungen regressiert werden, allerdings unter Berücksichtigung eines raumzeitlich korrelierten Residuums (Hasselmann 1979, 1993). Werden zudem die Unsicherheiten der Klimamodell-basierten Prädiktormuster berücksichtigt, wird statt OLS die Total Least Squares Regression verwendet (Allen und Stott 2003; Barnett et al. 2005). Zentrales Problem ist dann die Schätzung nicht-singulärer Kovarianzmatrizen für die hochdimensionalen Raum-Zeitmuster in Simulationen und Beobachtungen (Hannart und Naveau 2014). Dieser gesamtheitliche Blick wird auch als Erdsystemwissenschaft verstanden und im „ZukunftsreportWissenschaft“ durch die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina zusammengefasst, um relevante Fragen der mittel- und langfristigen Entwicklung in den Erdwissenschaften aufzugreifen (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2022; Oncken et al. 2022). Außerdem wird seit etwa zehn Jahren untersucht, ob und wie stark meteorologische oder ozeanographische Einzelereignisse (insbesondere Extremereignisse wie Hitzewellen oder Starkregen) durch den anthropogenen Klimawandel modifiziert werden. Hier kommen Verfahren aus dem Bereich der epidemiologischen Studien zur Kausalität zum Tragen (Hannart et al. 2016; Pearl 2000).

In WG1 werden zusätzlich zum Thema Klimawandel innerhalb des vergangenen und des zukünftigen Jahrhunderts auch die Klimaänderungen über sehr viel größere Zeiträume in der Vergangenheit diskutiert. Die Rekonstruktionen z. B. von Temperatur oder Niederschlag für die vergangenen 7000 Jahre (Holozän) oder der letzten 1 Mio. Jahre aus Stellvertreterdaten, die geologischen (Sedimente), glaziologischen (Eisbohrkerne) oder biologischen (Baumringe) Archiven entnommen werden, erfordern ebenfalls komplexe statistische Modellierung der entsprechenden Umwelt vs. Archiv Zusammenhänge.

In der zweiten Working Group *Auswirkungen des Klimawandels auf sozio-ökonomische Systeme* geht es um den Impact – die Folgen des Klimawandels, Anpassung und Verwundbarkeit. Zentral sind Risikoabschätzungen zu Veränderungen natürlicher Ökosysteme an Land und Ozean oder Abschätzungen der Einflüsse von Klimaänderungen auf Gesundheitsrisiken. Dabei wird Risiko definiert als ein Potenzial für nachteilige Folgen ökologischer und humaner Systeme. Die Abschätzungen laufen über die sogenannten „reasons-for-concern“, bei denen evidenzbasierte Ergebnisse mit Expertenwissen kombiniert werden. Zentral ist dabei wieder die Zuordnung von extremen meteorologischen Ereignissen aber auch von großen Flutereignissen (Shrestha et al. 2019) oder Waldbränden (Gillett et al. 2004) zum anthropogen verursachten Klimawandel (z.B. Stott et al. 2016; Stone et al. 2013). Es wird eine Fülle statistischer Verfahren eingesetzt, so dass die Erwähnung einzelner Methoden an dieser Stelle dem Charakter des sechsten IPCC-Sachstandsberichts nicht gerecht würde.

In der dritten Working Group *Vermeidung von und Anpassung an anthropogene(n) Klimaänderungen* geht es um Minderung und Vermeidung von anthropogen verursachten Klimaänderungen. Die Statistik ist hier vor allem bei der Konstruktion von Szenarien beteiligt, die in die Klimasimulationen aus WG I einfließen, zum Beispiel in Form von Zeitreihen von Konzentrationen bzw. Quellstärken von Treibhausgasen oder in die Beschreibung der Veränderungen der Landoberfläche (Ent- vs. Aufforstung). Es spielen Methoden aus der Wirtschaftsstatistik sowie aus dem Bereich demographischer Wandel eine Rolle. Zur Bewertung der Szenarien bzgl. der zu erwartenden Temperaturwirkung (z.B. Überschreiten des 1,5 Grad-/2 Grad-Ziels) kommen sogenannte Klimamodell-Emulatoren zum Einsatz: FAIR (Smith et al. 2018), CICERO-SCM (Skeie et al. 2021), oder MAGICC (Meinshausen et al. 2020), die mit den Ergebnissen der komplexen Klimamodelle kalibriert werden und probabilistische Aussagen zu zukünftigen Klimaänderungen unter den entsprechenden Szenarien erlauben.

Daten spielen bei der Untersuchung des Klimawandels eine zentrale Rolle. Bei den oben genannten Reanalysen handelt es sich dabei um massiv große Level 4 Quasi-Daten (siehe Anhang – Datenquellen), die durch Zusammenfassen und räumlich-zeitliches und physikalisch konsistentes Interpolieren vieler Einzeldatensätze umfangreiche Informationen zur Verfügung stellen. Dazu werden komplexe Klima- bzw. Wettervorhersage- oder Ozeanmodelle (die, wie oben dargestellt, auf Flussrechnungen für Energie, Drehimpuls, Wasser, etc. bestehen) möglichst gut entsprechend einem Optimalitätskriterium mit den entsprechenden Beobachtungsdaten unter Verwendung der Modell- und Beobachtungsunsicherheiten synchronisiert. Diese Daten spielen auch bei den zeitlich befristet geförderten Forschungsverbünden wie ClimX-treme (ClimXtreme 2020) eine zentrale Rolle, unterscheiden sich von den klassischen „Messstations-Daten“ und liefern neben den modifizierten Originaldaten auch nichtbeobachtbare Zusatzinformationen (hidden variables), die oft für Fragestellungen aus den WG II und WG III des IPCC verwendet werden können.

6 Daten

Jegliche statistische Darstellung, sei es das direkte Abbilden von erfassten Daten oder von analytischen Ergebnissen bis hin zur komplexen Darstellung im Rahmen von kohärent aufeinander abgestimmten Gesamtrechnungen, basiert im Grunde auf Daten; für die Weiterverarbeitung und Interpretation sind Metadaten ebenso relevant.

So heterogen wie wir das Thema „Umweltstatistik“ in den vorherigen Unterkapiteln kennengelernt haben, so unterschiedlich sind auch die Herausforderungen im Handlungsfeld Daten. Dabei sind Daten oftmals nicht das Endprodukt der statistischen Arbeit, sondern vielmehr vergleichbar mit Rohstoffen, die für Konsumenten auch erst zu Produkten verarbeitet werden müssen, bevor sie als meist leichter interpretierbare, statistisch unterlegte Informationen einen Nutzen bringen. In den Bereichen Umweltepidemiologie und Umwelthandeln werden Daten in Studien oder Befragungen erhoben, durch Daten aus dem Umweltbereich, z. B. zu Expositionen ergänzt, und mit (fortgeschrittenen) statistischen Methoden analysiert (siehe Kapitel 2 und 3) und interpretiert. Auch zur Untersuchung des Klimawandels stehen Daten aus unterschiedlichen Datenquellen und Datenbanken zur Verfügung und werden mit statistischen Modellen und Verfahren ausgewertet (vgl. Kapitel 5). Anders stellt sich die Situation im Bereich Ökosystemrechnungen (Kapitel 4) dar. Hier muss die Datenbasis in Deutschland erst noch aufgebaut werden, die dann für weiterführende, auch weltweite statistische Modellierungen eingesetzt werden kann. Zudem haben die vorherigen Kapitel gezeigt, dass für schnellere und zielgerichtete umweltpolitische Aussagen weitere Daten benötigt werden. Hinzukommen Probleme bei der Verknüpfung verschiedener Datenquellen und beim Datenzugang für die Wissenschaft, die im Folgenden detaillierter betrachtet werden.

6.1 Datenverknüpfung

Um sinnvolle Ergebnisse für konkrete umweltpolitische Fragestellungen zu erhalten, ist es oft notwendig, Daten aus dem Umweltbereich miteinander oder auch mit Daten anderer Domänen wie der Wirtschaftsstatistik oder der Epidemiologie zu verknüpfen. Dies setzt zwingend voraus, dass diese – abgesehen von Anforderung an deren Qualität – kontextbezogen zusammenpassen oder passend gemacht werden, was z. B. dadurch geschehen kann, dass Daten in einen konsistenten Kontextrahmen, ähnlich einem Buchhaltungssystem eingepasst werden. Für den Themenkomplex Wirtschaft und Umwelt haben sich hierfür auf gesamtgesellschaftlicher Ebene die statistischen Standards des ‚System of Environmental Economic Accounting‘ (SEEA) (United Nations et al. 2014, 2021) etabliert. Für den Bereich Geodaten ist mit der INSPIRE Richtlinie (Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft, <https://inspire.ec.europa.eu/>) eine gute Grundlage gelegt, so dass mehr und mehr Geodaten harmonisiert und interoperabel zur Verfügung gestellt werden. In Deutschland erschwert die föderale Struktur, dass Daten bundesweit vergleichbar zur Verfügung stehen.

Daten- und Metadatenstandards stellen sicher, dass die verknüpften Daten nach möglichst einheitlichen Definitionen und Abgrenzungen zusammenpassen (z. B. zwischen Umwelt- und Wirtschaftsstatistik). Zum anderen sichern sie die für Verknüpfung und Aggregation notwendige räumliche und zeitliche Konsistenz. Bei geo-

referenzierten Daten können dazu unter Beachtung der räumlichen Auflösung der Datenquellen einheitliche räumliche Analyseeinheiten (z. B. Gitterzellen) verwendet werden. Zeitliche Konsistenz bezieht sich auf die Frequenz und Periodizität von Erhebungen, aber auch auf kontextuelle Zusammenhänge (z. B., wenn der Zeitpunkt von Emissionen vom Zeitpunkt der Abgabe von Emissionszertifikaten abweicht).

Eine Grundvoraussetzung für das Verknüpfen von Daten stellt der Zugang zu diesen und den zugehörigen Metadaten dar. Hierbei gibt es je nach Quelle und Anwendung sehr heterogene Voraussetzungen. Deutschlandweit sollen gemeinsame Standards im Rahmen der Nationalen Forschungsdateninfrastrukturen (NFDI) aufgebaut und gefördert werden, um Kooperationen und gemeinsame Auswertungen basierend auf den *FAIR*-Prinzipien (*F*indable – Auffindbar, *A*ccessible – Zugänglich, *I*nteroperable – Interoperabel, *R*eusable – Wiederverwendbar, <https://www.go-fair.org/>) zu ermöglichen und zu vereinfachen (z. B. NFDI4health im Gesundheitsbereich).

6.2 Datenzugang

Zur effizienten Analyse der komplexen Zusammenhänge in der Umweltstatistik ist daher ein umfassender Zugang zu Forschungsdaten eine zentrale Voraussetzung. Ressourcen wie Registerdaten, Mikrodaten, Survey- und Gesundheitsdaten müssen sicher, transparent und datenschutzgerecht nutzbar gemacht werden. Zwar haben wir es einerseits mit großen Datenmengen (Big Data) zu tun, aber andererseits auch mit einem Datenmangel. Oft fehlen Surveydaten, z. B. zu akuten oder brisanten Themen. Auch eine Verknüpfung von Survey- oder Registerdaten mit relevanten anderen Datenquellen (wie z. B. die Exposition gegenüber Umweltrisikofaktoren am Wohnort) ist oftmals nicht machbar, da die Wohnorte oder andere Schlüsselinformationen nicht bekannt oder aus Datenschutzgründen nur vergrößert oder gar nicht verwendet werden dürfen. Weniger hoch aufgelöste Daten und Mittelung über Gemeinden oder Postleitzahlen werden einer hohen räumlichen Variabilität (z. B. von Luftschadstoffen) nicht gerecht, führen zu einer deutlichen Reduktion der Expositionskontraste und damit zu einer Unterschätzung der Gesundheitseffekte. Methodisch steht deshalb beispielsweise die Erforschung der Möglichkeiten von Mikrosimulation zur statistisch fundierten Schätzung und Schließung von Datenlücken auf der Agenda.

Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR) basieren heute noch zum Großteil auf bereits hoch aggregierten Ergebnissen aus der amtlichen Statistik. Hier kann zukünftig die verstärkte Verwendung und Verknüpfung von Mikrodaten zu erheblichen Qualitätsverbesserungen führen. Erste Pilotprojekte wurden im Bereich der Berichterstattung zu Emissionszertifikaten (EU ETS) oder beim Aufbau der Ökosystemrechnungen begonnen. Im ersten Fall werden direkt Emissionsdaten auf Anlagenebene als Ausgangsdaten herangezogen; im zweiten Fall dienen größtenteils sehr detaillierte georeferenzierte Luftbilder als Basis.

Im Gegensatz dazu stehen den amtlichen Gesamtrechnungen zahlreiche andere Verwaltungsdatenquellen – insbesondere solche mit wirtschaftlichem Bezug – noch nicht offen. Die UGR würden unter anderem von einer gut funktionierenden, bundesweit einheitlichen Datenbereitstellung sowie von einem erleichterten Zugang zu Verwaltungsdaten profitieren. Dies ist momentan (noch) nicht gegeben und macht

damit Ergebnisse aus Deutschland durch notwendige Schätzungen teils weniger valide als die anderer Staaten. Im Bereich Fernerkundung ist eine Bereitstellung von qualitätsgeprüften, nutzungsbereiten und teils maßgeschneidert aufbereiteten Datenprodukten, deren Fortschreibung durch internationale und nationale Institutionen langfristig gewährleistet ist, essenziell.

Das geplante Forschungsdatengesetz sowie das zukünftige deutsche Dateninstitut sollten diese Bedarfe zum Datenzugang berücksichtigen. Konkrete Maßnahmen schlägt auch der Abschlussbericht der vom Statistischen Bundesamt eingesetzten „Kommission Zukunft Statistik“ unter anderem in einem Use Case zur Nachhaltigen Entwicklung vor (Kommission Zukunft Statistik 2024). Auf europäischer Ebene werden entsprechende Forderungen in dem jüngst veröffentlichten Jahresbericht des Governance Advisory Board der Europäischen Statistik aufgestellt (ESGAB 2022).

Die wichtigsten Datenquellen für diesen Artikel sind in einer Datenübersichtstabelle zusammengefasst, welche im Anhang aufgeführt ist. Aktualisierungen lassen sich über die Homepage der DAGStat unter <https://www.dagstat.de/fileadmin/dagstat/documents/Datenubersicht-20230306.xlsx> finden.

7 Schlussfolgerungen: Was jetzt zu tun ist

Wichtige Anwendungsgebiete für umweltstatistische Methoden gibt es derzeit zuhauf, das haben die vorherigen Kapitel eindrucksvoll demonstriert. Wie aber kann die Umweltstatistik der damit verbundenen gesellschaftlichen Verantwortung gerecht werden? Sie ist einerseits aufgefordert, sich weiterzuentwickeln und dabei über die Grenzen des eigenen Fachs hinauszuwachsen. Unterstützend können dafür die folgenden Empfehlungen wirken:

Prioritäten setzen: Auch die Umweltstatistik muss sich fragen, wie sie mit den eigenen, ebenfalls begrenzten Ressourcen umgehen sollte. Forschende, Engagierte und Organisationen müssen Prioritäten definieren. Handlungsleitend sollten dabei tatsächliche Risiken sein, abgestuft nach wissenschaftlich bewerteter Relevanz und Dringlichkeit. Ein Beispiel zur Orientierung ist das Modell der planetaren Grenzen (siehe Abb. 3). Diese benennen konkrete Problembereiche, deren Erforschung sich die Umweltstatistik mit Hochdruck widmen sollte.

Interdisziplinär forschen: Diese Forschung sollte die Umweltstatistik angesichts der Komplexität der Fragestellungen jedoch keinesfalls alleine betreiben, sondern, wann immer möglich, in interdisziplinären Kooperationen. Die Zusammenarbeit mit anderen Fachrichtungen sollte deutlich intensiviert werden, um umweltstatistische Methoden wirkungsvoll einsetzen zu können. Das umfasst gemeinsame Projekte mit Natur-, Human- und Gesellschaftswissenschaften ebenso wie mit Behörden der amtlichen Statistik.

Wirkungsvoll kommunizieren: Brücken muss die Umweltstatistik indes nicht nur zu anderen Wissenschaftsdisziplinen bauen. Sie sollte auch Gesellschaft und Politik berücksichtigen und sicherstellen, dass ihre zuweilen abstrakten Ergebnisse

dort verfangen, wo sie für aktuelle Debatten und Entscheidungen benötigt werden. Elementar ist dafür einerseits eine zielgruppengerechte, einfachere Kommunikation statistischer Ergebnisse, zum anderen eine Stärkung der Data und Statistical Literacy auf Empfängerseite. Auf beide Herausforderungen würden sich verstärkte Kooperationen mit dem Daten- oder Wissenschaftsjournalismus positiv auswirken. Diese würden zudem dafür sorgen, dass gesellschaftlich besonders relevante Fragen in den Fokus rücken – etwa zur Frage der Rechenschaft für algorithmische Systeme, die mithilfe statistischer Verfahren automatisierte Entscheidungen treffen.

Damit die Umweltstatistik ihre Wirksamkeit im Sinne der Gesellschaft entfalten kann, braucht sie jedoch ebenfalls Unterstützung von außen – konkret von politischen Entscheidungsträgern. Welche Maßnahmen aktuell am wichtigsten erscheinen, lässt sich in drei Forderungen an die Politik zusammenfassen:

Ambitioniert handeln: Aus den Datenanalysen der Umweltstatistik ergibt sich regelmäßig eine hohe Relevanz und Dringlichkeit evidenzbasierter Maßnahmen. Die Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik sollte diese Erkenntnisse ernst nehmen. So lassen sich Schadstoffe z. B. nur dann wirkungsvoll reduzieren, wenn Risikobewertungen zeitnah umgesetzt und Grenzwerte schneller gesenkt werden.

Unabhängige Forschung stärken: Die Umweltstatistik muss im Hochschulsystem stärker verankert werden. Nur so können nachhaltige Strukturen etabliert werden, die eine Kontinuität unabhängig von politischen Machtstrukturen sicherstellen. Im Bereich Umweltstatistik und Umwelthandeln sollten Professuren geschaffen werden, um notwendige Forschungsvorhaben aufbauen zu können, etwa zu Stoffströmen und Flussrechnungen. Auf diese Weise können spezifische Sonderforschungsbereiche und Schwerpunktprogramme entstehen.

Datenzugang verbessern: Damit die Umweltstatistik die komplexen Zusammenhänge des Umwelthandelns besser evidenzbasiert erforschen und evaluieren kann, benötigt sie einen umfassenden Zugang zu Forschungsdaten. Ressourcen wie Registerdaten, Mikrodaten, Survey- und Gesundheitsdaten müssen sicher, transparent und datenschutzgerecht nutzbar gemacht werden. Diese Forderung wird durch den Bericht der KomZS (Kommission Zukunft Statistik 2024) unterstützt. Das geplante Forschungsdatengesetz sollte diesen Bedarf ebenso berücksichtigen wie das künftige deutsche Dateninstitut.

8 Anhang

8.1 Datenquellen

Die folgenden Datenquellen bzw. Daten (Tab. 1) werden nach unterschiedlichen Kriterien beschrieben und bewertet. Level-Angaben (Level 0–4) beschreiben den Grad der Datenverarbeitung (<https://help.marine.copernicus.eu/en/articles/5046705-which-levels-are-used-for-data-processing>).

Tab. 1 Daten

Name	Datenquelle (URL, Datenbank, ...)	Datenformat	Level ¹	FAIR-Prinzipien ²	5-star open data model ³	Eigentümer/ von wem erhoben bzw. gesammelt	Räumlich-zeitliche Auflösung	Seit wann	Kennwerte/ Metriken	Bemerkungen
NFDI4Earth	https://www.nfdi4earth.de/2interoperate/repositories-and-infrastructures	NFDI4Earth addresses digital needs of Earth System Sciences. NFDI4Earth is a community-driven process providing researchers with FAIR, coherent, and open access to all relevant Earth System data	–	–	–	NFDI Consortium Earth System Sciences	Liste von diversen Datenrepositorien innerhalb der Erdsystem-Wissenschaften	–	–	Verweise auf die Repositorien
Internationale Reanalyse-Ergebnisse Atmosphäre/Ozean	https://reanalyses.org	Observations and a numerical model simulating one or more aspects of the Earth system are combined objectively to generate a synthesized estimate of the state of the atm/ocean system	4	–	–	Verschieden	Listen von diversen Datenrepositorien mit Reanalyse Ergebnissen	–	Diverse meteorologische und ozeanographischer Daten	–
Pangäa	https://www.pangaea.de/	Verschieden	2 und 3	FAIR	–	Verschieden	Weltweit, zeitlich je nach Datensatz unterschiedlich	–	Data Publisher for Earth & Environmental Science	–
Copernicus Climate Change Service C3S data store	https://cds.climate.copernicus.eu/	Grib, netCDF4	4	FAIR	–	C3S	Weltweit, jährlich, monatlich, stündlich	1950–rezent	Diverse meteorologische/klimatologische Daten	–

Tab. 1 (Fortsetzung)

Name	Datenquelle (URL, Datenbank, ...)	Datenformat	Level ¹	FAIR-Prinzipien ²	5-star open data model ³	Eigentümer/ von wem erhoben bzw. gesammelt	Räumlich- zeitliche Auf- lösung	Seit wann	Kennwerte/ Metriken	Bemerkungen
Copernicus Atmospheric Monitoring Service CAMS data store	https://ads.atmosphere.copernicus.eu/	Grib, netCDF4	4	FAIR	–	CAMS	Weltweit, jährlich, 3 h-stündlich	2003–rezent	Meteorologische Daten, Luftverschmutzungsdaten	–
Deutscher Wetterdienst DWD, openData	https://opendata.dwd.de	Bufr, grib, netCDF, CSV	2, 3 und 4	FAIR	–	DWD	Weltweit, Deutschland-weit, monatlich bis mehrjährig	Ende 19./Anfang 20. Jahrhundert bis rezent	Diverse meteorologische, variable, vorhersage, Radar, Klima	–
Hans Ertel Zentrum/DWD Regional Reanalysis COSMO-REA6 und COSMO-REA2	https://opendata.dwd.de/climate_environment/REA	Grib	4	FAIR	–	Hans Ertel Zentrum für Wetterforschung, Teilprojekt Bonn/Köln, DWD	Atlantisch-Europäischer Raum, 15 min oder 1 h, 6 km * 6 km Gitter, 40 Schichten	1995–2019	Diverse meteorologische, variable	–
State of global air	https://www.stateofglobalair.org/	Csv, Karten, Zeitreihen	4	FAIR	***** (5)	HEI, IHME	Weltweit, zeitlich je nach Datensatz unterschiedlich	2000	Grafiken, deskriptive Statistiken, Erläuterungen von wiss. Erkenntnissen	–

Tab. 1 (Fortsetzung)

Name	Datenquelle (URL, Datenbank, ...)	Datenformat	Level ¹	FAIR-Prinzipien ²	5-star open data model ³	Eigentümer/ von wem erhoben bzw. gesammelt	Räumlich-zeitliche Auflösung	Seit wann	Kennwerte/ Metriken	Bemerkungen
EEA air quality statistics	https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-quality-statistics	Csv, Karten, Zeitreihen	3	FAIR	***** (5)	European Environment Agency	EU (politisch und geographisch), diverse zeitliche Auflösungen, idR jährlich	2013	Grafiken, deskriptive Statistiken, Erläuterungen von wiss. Erkenntnissen	–
UBA Daten zur Umwelt	https://www.umweltbundesamt.de/daten	Csv, Karten, Zeitreihen	3,4	FAIR	***** (5)	Umweltbundesamt	Deutschland, zeitlich je nach Datensatz unterschiedlich	2000	Grafiken, deskriptive Statistiken, Erläuterungen von wiss. Erkenntnissen	–
European Environment Information Observation Network (EIONET) – Central Data Repository	https://cdr.eionet.europa.eu/	Csv	–	–	***** (5)	European Environment Agency	EU (politisch und geographisch), diverse zeitliche Auflösungen, idR jährlich	Abhängig vom Produkt	Reines Daten Repository	–
INKAR – Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung	https://www.inkar.de/	Csv	–	–	***** (5)	–	Deutschland, zeitlich je nach Datensatz unterschiedlich	Abhängig vom Produkt	–	–

Tab. 1 (Fortsetzung)

Name	Datenquelle (URL, Datenbank, ...)	Datenformat	Level ¹	FAIR-Prinzipien ²	5-star open data model ³	Eigentümer/ von wem erhoben bzw. gesammelt	Räumlich-zeitliche Auflösung	Seit wann	Kennwerte/ Metriken	Bemerkungen
OECD environmental data and indicators	https://www.oecd.org/en/indicators-outlooks/data-and-indicators.htm	Csv, xml, API	3,4	FAIR	***** (5)	OECD	Weltweit, zeitlich je nach Datensatz unterschiedlich	Wio	Grafiken, deskriptive Statistiken, Erläuterungen von wiss. Erkenntnissen	–
BKG Geodaten	https://www.bkg.bund.de	Csv, gpk, Karten, Webdienste	3,4	FAIR	***** (5)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	–	Abhängig vom Produkt	Karten inkl. Erläuterungen	–
Climate Data Center	https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html	Csv, html	3	FAIR	***** (5)	Deutscher Wetterdienst	Deutschland, zeitlich je nach Datensatz unterschiedlich	Abhängig vom Produkt	Reines Daten Repository	–
Flächenbilanz der Ökosysteme	https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/oekosystem-gesamtrechnungen/_inhalt.html	Xlsx, Raster(.tif)	–	–	**	StBA	Bundesweit, 3-jährlich	2015	Accountingtabellen, Veränderungs-matrizen, Geodaten	Geodaten derzeit auf Anfrage beim StBA verfügbar, ab Mitte 2023 werden diese auch zum direkten Download bereitgestellt

Tab. 1 (Fortsetzung)

Name	Datenquelle (URL, Datenbank, ...)	Datenformat	Level ¹	FAIR-Prinzipien ²	5-star open data model ³	Eigentümer/ von wem erhoben bzw. gesammelt	Räumlich-zeitliche Auflösung	Seit wann	Kennwerte/ Metriken	Bemerkungen
Zustandsbilanz der Ökosysteme	https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/UGR/oekosystem-gesamtrechnungen/_inhalt.html	Xlsx, csv, Raster(.tif)	–	–	**	StBA	Bundesweit, 3-jährlich	2015	Accountingtabellen, Veränderungsmatrizen, Geodaten	„im Aufbau“
Leistungsbilanz der Ökosysteme	https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/UGR/oekosystem-gesamtrechnungen/_inhalt.html	Xlsx, csv, Raster(.tif)	–	–	**	StBA	Bundesweit, 3-jährlich	2015	Accountingtabellen, Veränderungsmatrizen, Geodaten	„im Aufbau“
GESIS Panel Kernstudie (Studiencode „zd“)	https://www.gesis.org/gesis-panel/home/longitudinal-core-studies	Csv, dta (Stata), sav (SPSS)	?	FAIR	***** (5)	GESIS	Bundesweit, Umweltmodul jährlich	2014	Umweltinspektion und -verhalten	–

Tab. 1 (Fortsetzung)

Name	Datenquelle (URL, Datenbank, ...)	Datenformat	Level ¹	FAIR-Prinzipien ²	5-star open data model ³	Eigentümer/ von wem erhoben bzw. gesammelt	Räumlich-zeitliche Auflösung	Seit wann	Kennwerte/ Metriken	Bemerkungen
Sozioökonomisches Panel (SOEP)	https://www.diw.de/de/diw_01.c.678568.de/forschungscdataenzen-trum_soep.html	Csv	?	FAIR	***** (5)	DIW Berlin	Bundesweit, jährliche Panelerhebung mit wiederholendem Umweltmodul	1984	Umweltverhalten	–
Umweltbewusstsein in Deutschland/ Umweltbewusstseinsstudie	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen	Graphiken	?	FAIR	***** (5)	BMUV/UBA	Bundesweit, Zweijahresrhythmus	1996	Grafiken, deskriptive Statistiken, Erläuterungen von wiss. Erkenntnissen	–
International Social Survey Programme (ISSP; Modul „Environment“)	https://issp.org	Csv, dta (Stata), sav (SPSS)	?	FAIR	***** (5)	GESIS	International in unregelmäßigen Abständen mit wiederholendem Umweltmodul	1993	Umweltmessungen, -überzeugungen, -handeln	–
Allgemeine Bevölkerungsumfrage der Sozialwissenschaften (ALLBUS)	https://www.gesis.org/allbus/allbus	Csv, dta (Stata), sav (SPSS)	?	FAIR	***** (5)	GESIS	Bundesweit, Zweijahresrhythmus mit wiederholendem Umweltmodul	1980	Wahrnehmung von Umweltbelastungen, Umweltmessungen	–

Die FAIR-Prinzipien geben einen Rahmen für rechtliche und technische Möglichkeiten vor, mit dem Ziel die Wiederverwendbarkeit von Datenbeständen für neue Nutzungsszenarien zu verbessern. Auch das 5-Star Open Data Modell dient der Beschreibung der Datenqualität veröffentlichter Daten und nutzt dazu ein fünfstufiges Kaskadensystem (<https://5stardata.info/en/>).

Danksagung Die Autorinnen und Autoren danken der Deutschen Arbeitsgemeinschaft Statistik (DAG-Stat) für die Ausrichtung des Symposiums „Δ (Statistik + Umweltpolitik): Beschleunigung umweltpolitischer Entscheidungen durch verlässliche Daten und effiziente statistische Methoden“, das am 24.03.2023 am Bundesinstitut für Risikobewertung in Berlin stattgefunden hat, und für die Nutzung der Stellungnahme zum Thema „Umweltstatistik“ (DAGStat 2023), die Grundlage dieses Artikels ist. Sie danken außerdem dem Editor sowie zwei anonymen Gutachterinnen bzw. Gutachtern.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Interessenkonflikt K. Ickstadt gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Literatur

- Abbass K, Qasim MZ, Song H, Murshed M, Mahmood H, Younis I (2022) A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environ Sci Pollut Res* 29:42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Allen MR, Stott PA (2003) Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, Part I: Theory. *Clim Dyn* 21:477–491. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0313-9>
- Anders J, Schubert S, Sauter T, Tunn S, Schneider C, Salim M (2023) Modelling the impact of an urban development project on microclimate and outdoor thermal comfort in a mid-latitude city. *Energy Build* 296:113324. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113324>
- Andersen HK, Mayerl J (2022) Is the effect of environmental attitudes on behavior driven solely by unobserved heterogeneity? *Kölner Z Soziologie Sozialpsychologie* 74(3):381–408. <https://doi.org/10.1007/s11577-022-00855-2>
- Balderjahn I, Peyer M, Klemm A (2015) Nachhaltiges Konsumbewusstsein: Validierung eines neuen Messansatzes anhand einer repräsentativen Online-Befragung. https://www.nim.org/sites/default/files/medien/359/dokumente/2015_gfk_verein_nachhaltiges_konsumbewusstsein.pdf
- Balmaseda MA, Mogensen K, Weaver AT (2013) Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Quart J Royal Meteorol Soc* 139(674):1132–1161. <https://doi.org/10.1002/qj.2063>
- Bamberg S, Möser G (2007) Twenty years after Hines, Hungerford, and Tomera: A new meta-analysis of psycho-social determinants of pro-environmental behavior. *J Environ Psychol* 27(1):14–25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2006.12.002>
- Bar H (2021) COVID-19 lockdown: animal life, ecosystem, and atmospheric environment. *Environ Dev Sustain* 23(6):8161–8178. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01002-7>
- Barnett T, Zwiers F, Hegerl G, Allen M, Crowley T, Gillett N et al (2005) Detecting and attributing external influences on the climate system. *J Climate* 18:1291–1314. <https://doi.org/10.1175/JCLI3329.1>
- Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, Andersen ZJ, Weinmayr G, Hoffmann B 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(9919):785–795. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)62158-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62158-3)

- Behr SM, Köveker T, Küçük M (2024) DIW-Wochenbericht 45/2024 https://doi.org/10.18723/diw_wb:2024-45-1
- Bengtsson L, Shukla J (1988) Integration of space and in situ observations to study global climate change. *Bull Am Meteorol Soc* 69(10):1130–1143
- Bernauer T, McGrath LF (2016) Simple reframing unlikely to boost public support for climate policy. *Nature Clim Change* 6(7):680–683. <https://doi.org/10.1038/nclimate2948>
- BMUKN (2024) Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt 2030. <https://www.bundesumweltministerium.de/download/die-nationale-strategie-zur-biologischen-vielfalt-2030-nbs-2030>. Zugegriffen: 15. Sept. 2025
- BMUV (2022) Montreal Moment für die Natur. <https://www.bmu.de/pressemitteilung/montreal-moment-fuer-die-natur>. Zugegriffen: 9. März 2023
- BMWK (2023) Jahreswirtschaftsbericht 2023. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/jahreswirtschaftsbericht-2023.pdf>. Zugegriffen: 9. März 2023
- Bruderer Enzler H, Diekmann A (2019) All talk and no action? An analysis of environmental concern, income and greenhouse gas emissions in Switzerland. *Energy Res Soc Sci* 51:12–19. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.001>
- Brunekreef B, Strak M, Chen J, Andersen ZJ, Atkinson R, Bauwelinck M et al (2021) Mortality and morbidity effects of long-term exposure to low-level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: an analysis of European cohorts in the ELAPSE project. *Res Rep Health Eff Inst* 208:1–127
- Bücher A, Zanger L (2023) On the disjoint and sliding block maxima method for piecewise stationary time series. *Ann Stat* 51(2):573–598
- Bun R, Marland G, Oda T, See L, Puliafito E, Nahorski Z et al (2024) Tracking unaccounted greenhouse gas emissions due to the war in Ukraine since 2022. *Sci Total Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169879>
- Carrington MJ, Neville BA, Whitwell GJ (2010) Why ethical consumers don't walk their talk: towards a framework for understanding the gap between the ethical purchase intentions and actual buying behaviour of ethically minded consumers. *J Bus Ethics* 97:139–158. <https://doi.org/10.1007/s10551-010-0501-6>
- CBD (2022) Kunming–Montreal global biodiversity framework Bd 15. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal
- Charlson F, Ali S, Benmarhnia T, Pearl M, Massazza A, Augustinavicius J, Scott JG (2021) Climate change and mental health: a scoping review. *Int J Environ Res Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094486>
- Chiles JP, Delfiner P (2012) Geostatistics: modeling spatial uncertainty Bd 713. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken
- Christidis N, Jones GS, Stott PA (2015) Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Clim Change* 5(1):46–50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2468>
- ClimXtreme (2020) ClimXtreme. Ein Forschungsnetzwerk zu Klimaextremen und Klimaänderungen. <https://www.climxtreme.net/index.php/en/home-de>. Zugegriffen: 10. März 2023
- Cressie N, Wikle CK (2011) Statistics for spatio-temporal data. Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken
- DAGStat (2023) DAGStat-Stellungnahme zum Thema „Umweltstatistik“. https://www.dagstat.de/fileadmin/dagstat/documents/DAGStat-Stellungnahme_Umweltstatistik_16032023.pdf. Zugegriffen: 23. Apr. 2024
- Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Deo H et al (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
- Diekmann A, Preisendörfer P (2001) Umweltsoziologie. Eine Einführung. Rowohlt, Reinbek
- Diekmann A, Preisendörfer P (2003) Green and greenback. The behavioral effects of environmental attitudes in low-cost and high-cost situations. *Ration Soc* 15(4):441–472. <https://doi.org/10.1177/1043463103154002>
- van Donkelaar A, Martin RV, Li C, Burnett RT (2019) Regional estimates of chemical composition of Fine particulate matter using a combined Geoscience-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environ Sci Technol* 53(5):2595–2611. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06392>
- Dunlap RE, van Liere KD (1978) The “new environmental paradigm”. *J Environ Educ* 9(4):10–19. <https://doi.org/10.1080/00958964.1978.10801875>

- Ebel A, Memmesheimer M, Jakobs HJ, Feldmann H (2007) Advanced air pollution models and their application to risk and impact assessment. In: Ebel A, Davitashvili T (Hrsg) Air, water and soil quality modelling for risk and impact assessment. Springer, Dordrecht, S 83–92
- EDGAR (2023) Report 2023. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023#emissions_table. Zugegriffen: 23. Apr. 2023
- Eppler E (1975) Ende oder Wende. Von der Machbarkeit des Notwendigen. W.Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln und Mainz
- ESGAB (2022) Annual report executive summary and recommendations. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/34693/16235793/ESGAB-2022-zusammenfassung-bempfehlungen.pdf/e247fbf5-9e96-0c20-8694-4c6cee244132?t=1678098296032>
- Ester P, Van der Meer F (1982) Determinants of individual environmental behavior: an outline of a behavioral model and some research findings. Netherlands' J Sociol 18:57–94
- Europäische Kommission (2008on) Directive 2008/50/EC of the European parliament and of the council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for europe (OJL 152). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050>. Zugegriffen: 14. März 2023
- Europäische Kommission (2019a) Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions the European green deal. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>. Zugegriffen: 14. März 2023
- Europäische Kommission (2019b) Fitness check of the ambient air quality directives. Directive 2004/107/EC relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air and directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for europe. World Health Organization, Geneva
- Europäische Kommission (2021) Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions pathway to a healthy planet for all EU action plan: 'towards zero pollution for air, water and soil. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0400&qid=1623311742827>. Zugegriffen: 14. März 2023
- Europäische Kommission (2023) 2050 long-term strategy. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en
- Europäische Kommission (o.J.) Null-Schadstoff-Aktionsplan Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden. https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_de#:~:text=Nach%20der%20Null%2DSchadstoff%2DVision,eine%20schadstofffreie%20Umwelt%20geschaffen%20wird. Zugegriffen: 14. März 2023
- Europäische Kommission (o.J.) Ganzheitlicher EU-Ansatz für nachhaltige Entwicklung. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/international-strategies/sustainable-development-goals/eu-holistic-approach-sustainable-development_de. Zugegriffen: 9. März 2023
- Europäische Kommission, FAO, UN-Habitat, ILO, OECD, Weltbank (2021) Applying the degree of urbanisation—A methodological manual to define cities, towns and rural areas for international comparisons. Publications Office of the European Union, Luxembourg <https://doi.org/10.2785/706535>
- European Commission (2022) Proposal for a regulation of the European parliament and of the council amending regulation (EU) no 691/2011 as regards introducing new environmental economic accounts modules. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2022:329:FIN>. Zugegriffen: 13. März 2023
- Gellrich A, Burger A, Tews K, Simon C, Seider S (2021) 25 Jahre Umweltbewusstseinsforschung im Umweltressort. Langfristige Entwicklungen und aktuelle Ergebnisse. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_hgp_umweltbewusstseinsstudie_bf.pdf. Zugegriffen: 9. März 2023
- Georgy S, Lautenbach S, Jahn HJ, Katzschner L, Krämer A (2019) Erfassung von hitze- und feinstaubbedingten Gesundheitsrisiken in Deutschland: Ein epidemiologischer Studienansatz. Bundesgesundheitsblatt 62:782–791. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02960-8>
- Gillett NP, Weaver AJ, Zwiers FW, Flannigan MD (2004) Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. Geophys Res Lett. <https://doi.org/10.1029/2004gl020876>
- Grunewald K, Schweppe-Kraft B, Syrbe R-U, Meier S, Krüger T, Schorch M, Walz U (2020) Hierarchical classification system of Germany's ecosystems as basis for an ecosystem accounting—methods and first results. One Ecosyst 5:e50648. <https://doi.org/10.3897/oneeco.5.e50648>
- Hadler M, Klösch B, Schwarzingen S, Schweighart M, Wardana R, Bird DN (2022) Surveying climate-relevant behavior. Measurements, obstacles, and implications. Springer Nature, Cham

- Haines-Young R, Potschin M (2018) Common international classification of ecosystem services (CICES) V5.1. <https://cices.eu>
- Hammer MS, van Donkelaar A, Li C, Lyapustin A, Sayer AM, Hsu NC et al (2020) Global estimates and long-term trends of Fine particulate matter concentrations (1998–2018). *Environ Sci Technol* 54(13):7879–7890. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01764>
- Hannart A, Naveau P (2014) Estimating high dimensional covariance matrices: A new look at the Gaussian conjugate framework. *J Multivar Anal* 131:149–162. <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2014.06.001>
- Hannart A, Pearl J, Otto FEL, Naveau P, Ghil M (2016) Causal counterfactual theory for the attribution of weather and climate-related events. *B Am Meteorol Soc* 97:99–110. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00034.1>
- Hartmann J, Preisendörfer P (2021) Development and structure of environmental worries in Germany 1984–2019. *Z Soziol* 50(5):322–337. <https://doi.org/10.1515/zfsoz-2021-0022>
- Hasselmann K (1979) Linear statistical models. *Dyn Atmospheres Ocean* 3:501–521. [https://doi.org/10.1016/0377-0265\(79\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0377-0265(79)90029-0)
- Hasselmann K (1993) Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *J Climate* 6(10):1957–1971. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006)
- Hennig F, Sugiri D, Tzivian L, Fuks K, Moebus S, Jöckel K-H et al (2016) Comparison of land-use regression modeling with dispersion and chemistry transport modeling to assign air pollution concentrations within the Ruhr area. *Atmosphere* 7(3):48. <https://doi.org/10.3390/atmos7030048>
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Thépaut JN (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quart J Royal Meteorol Soc* 146(730):1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hines JM, Hungerford HR, Tomera AN (1987) Analysis and synthesis of research on responsible environmental behavior: A meta-analysis. *J Environ Educ* 18(2):1–8. <https://doi.org/10.1080/00958964.1987.9943482>
- Hoffmann B, Moebus S, Möhlenkamp S, Stang A, Lehmann N, Dragano N et al (2007) Residential exposure to traffic is associated with coronary atherosclerosis. *Circulation* 116(5):489–496. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.693622>
- Hölzer J, Midasch O, Rauchfuss K, Kraft M, Reupert R, Angerer J et al (2008) Biomonitoring of perfluorinated compounds in children and adults exposed to perfluorooctanoate-contaminated drinking water. *Environ Health Perspect* 116(5):651–657. <https://doi.org/10.1289/ehp.11064>
- de Hoogh K, Chen J, Gulliver J, Hoffmann B, Hertel O, Ketznel M et al (2018) Spatial PM_{2.5}, NO₂, O₃ and BC models for Western Europe—Evaluation of spatiotemporal stability. *Environ Int* 120:81–92. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.036>
- Huang F, Jiang S, Zhan W, Bechtel B, Liu Z, Demuzere M et al (2023) Mapping local climate zones for cities: A large review. *Remote Sens Environ*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113573>
- IHME (2024) Global burden of disease 2021: findings from the GBD 2021 study. Institute for Health Metrics and Evaluation, Seattle
- IPCC (2022) Sixth assessment report. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>. Zugriffen: 10. März 2023
- IPCC (2023) AR6 synthesis report: climate change 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Zugriffen: 19. März 2025
- Kaiser FG, Lange F (2021) Offsetting behavioral costs with personal attitude: Identifying the psychological essence of an environmental attitude measure. *J Environ Psychol* 75:101619. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101619>
- Khan I, Shah D, Shah SS (2021) COVID-19 pandemic and its positive impacts on environment: An updated review. *Int J Environ Sci Technol* 18:521–530. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03021-3>
- Kommission Zukunft Statistik (2024) Bericht und Empfehlungen der Kommission Zukunft Statistik. <https://www.destatis.de/DE/UEber-uns/Leitung-Organisation/KomZS/abschlussbericht.pdf>. Zugriffen: 23. Apr. 2024
- Krämer U, Herder C, Sugiri D, Strassburger K, Schikowski T, Ranft U, Rathmann W (2010) Traffic-related air pollution and incident type 2 diabetes: results from the SALIA cohort study. *Environ Health Perspect* 118(9):1273–1279. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901689>
- Lawrence MJ, Stemberger HLJ, Zolderdo AJ, Struthers DP, Cooke SJ (2015) The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment. *Environ Rev* 23(4):443–460. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0039>
- Levi S, Wolf I, Flachslund C, Koch N, Koller F, Edmonson D (2021) Klimaschutz und Verkehr: Zielerreichung nur mit unbekannten Maßnahmen möglich. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam

- Lilienthal J, Zanger L, Bücher A, Fried R (2022) A note on statistical tests for homogeneities in multivariate extreme value models for block maxima. *Environmetrics* 33(7):e2746
- Linden S, Töppich J (2021) Health Impact Assessment (HIA) / Gesundheitsfolgenabschätzung (GFA). In: Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BZgA) (Hrsg) Leitbegriffe der Gesundheitsförderung und Prävention. Glossar zu Konzepten, Strategien und Methoden <https://doi.org/10.17623/BZGA:Q4-i064-2.0>
- Loughner CP, Allen DJ, Zhang D-L, Pickering KE, Dickerson RR, Landry L (2012) Roles of urban tree canopy and buildings in urban heat island effects: parameterization and preliminary results. *J Appl Meteor Clim* 51:1775–1793. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0228.1>
- Lüthi S, Fairless C, Fischer EM, Scovronick N, Armstrong B, De Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M et al (2023) Rapid increase in the risk of heat-related mortality. *Nat Commun* 14:4894. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40599-x>
- MAIA (2022) Country fact sheet Germany. https://maiaportal.eu/storage/app/media/factsheets_2022/MAIA_DE_Factsheet_2022.pdf. Zugegriffen: 13. März 2023
- Maloney MP, Ward MP (1973) Ecology: Let's hear from the people. An objective scale for the measurement of ecological attitudes and knowledge. *Am Psychol* 28(7):583–586. <https://doi.org/10.1037/h0034936>
- Maloney MP, Ward MP, Braucht GN (1975) A revised scale for the measurement of ecological attitudes and knowledge. *Am Psychol* 30(7):787–790. <https://doi.org/10.1037/h0084394>
- Marando F, Heris MP, Zulian G, Udías A, Mentaschi L, Chrysoulakis N et al (2022) Urban heat island mitigation by green infrastructure in European functional urban areas. *Sustain Cities Soc* 77:103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
- Meinshausen M, Zebedee RJ, Nicholls JL, Gidden MJ, Vogel E et al (2020) The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci Model Dev* 13(8):3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- Min SK, Hense A, Paeth H, Kwon WT (2004) A Bayesian decision method for climate change signal analysis. *Meteorol Z* 13(5):421–436. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2004/0013-0421>
- Mousazadeh M, Paital B, Naghdali Z, Mortezaian Z, Hashemi M, Niaragh EK et al (2021) Positive environmental effects of the coronavirus 2020 episode: a review. *Environ Dev Sustain* 23(9):12738–12760. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01240-3>
- Naseer S, Wei Z, Aslam MS, Naseer S (2022) A mini-review: Positive impact of COVID-19 on arial health and ecology. *Environ Sci Pollut Res* 29(27):40520–40530. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19961-x>
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2022) Zukunftsreport Wissenschaft. Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle (Saale)
- Nonnemacher M, Jakobs H, Viehmann A, Vanberg I, Kessler C, Moebus S et al (2014) Spatio-temporal modelling of residential exposure to particulate matter and gaseous pollutants for the Heinz Nixdorf Recall Cohort. *Atmospheric Environ* 91:15–23. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.052>
- Nordmann S, Mues A, Feigenspan S (2020) Evaluierung flächenhafter Daten der Luftschadstoffbelastung in Deutschland aus der Chemie-Transportmodellierung. *Gefahrstoffe* 80(07–08):281–290. <https://doi.org/10.37544/0949-8036-2020-07-08>
- Notter DA, Meyer R, Althaus H-J (2013) The western lifestyle and its long way to sustainability. *Environ Sci Technol* 47(9):4014–4021. <https://doi.org/10.1021/es3037548>
- Oncken O, von Blanckenburg F, Wörner G, Schlosser P (2022) Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel
- Orban E, McDonald K, Sutcliffe R, Hoffmann B, Fuks KB, Dragano N et al (2016) Residential road traffic noise and high depressive symptoms after five years of follow-up: results from the Heinz Nixdorf recall study. *Environ Health Perspect* 124(5):578–585. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409400>
- Pearl J (2000) Causality: models, reasoning and inference. Cambridge University Press, Cambridge
- Pereira P, Bašić F, Bogunovic I, Barcelo D (2022) Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Sci Total Environ* 837:155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>
- PIK (2022) Update planetare Grenzen: Grenze für Süßwasser überschritten. <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/update-planetare-grenzen-suesswassergrenze-ueberschritten>. Zugegriffen: 9. März 2023
- PIK (2024) Darstellungen der Planetaren Grenzen. <https://www.pik-potsdam.de/de/produkte/infothek/planetare-grenzen/bilder>. Zugegriffen: 17. Nov. 2024
- Pitchika A, Hampel R, Wolf K, Kraus U, Cyrys J, Babisch W et al (2017) Long-term associations of modeled and self-reported measures of exposure to air pollution and noise at residence on preva-

- lent hypertension and blood pressure. *Sci Total Environ* 593–594:337–346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.156>
- Pozzer A, Dominici F, Haines A, Witt C, Münzel T, Lelieveld J (2020) Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19. *Cardiovasc Res* 116(14):2247–2253. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa288>
- Prinz AL, Richter DJ (2022) Long-term exposure to fine particulate matter air pollution: An ecological study of its effect on COVID-19 cases and fatality in Germany. *Environ Res* 204(Pt A):111948. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111948>
- Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen R, Samoli E, Stafoggia M, Weinmayr G 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(9):70279–70271. <https://doi.org/10.1016/S1470-2045>
- Radermacher WJ (2020) Official statistics 4.0—verified facts for people in the 21st century. Springer, Heidelberg <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31492-7>
- Rahmani N, Sharifi A (2025) Urban heat dynamics in local climate zones (LCZs): a systematic review. *Build Environ* 267(Pt B):12225. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112225>
- Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1978) Umweltgutachten 1978. Kohlhammer, Stuttgart, Mainz
- Rathjens J, Becker E, Kolbe A, Ickstadt K, Hölzer J (2021) Spatial and temporal analyses of perfluorooctanoic acid in drinking water for external exposure assessment in the Ruhr metropolitan area, Germany. *Stoch Environ Res Risk Assess* 35:1127–1143. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01932-8>
- Ray RL, Singh VP, Singh SK, Acharya BS, He Y (2022) What is the impact of COVID-19 pandemic on global carbon emissions? *Sci Total Environ* 816:151503. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151503>
- Röhl C, Kolossa-Gehring M (2022) Human-Biomonitoring – ein wichtiger Baustein zur Umsetzung der EU-Chemikalienstrategie. Die Arbeit der Human-Biomonitoring-Kommission am Umweltbundesamt. *Bundesgesundheitsblatt* 65:849–852. <https://doi.org/10.1007/s00103-022-03579-y>
- Savitz DA, Wellenius GA (2022) Can cross-sectional studies contribute to causal inference? It depends. *Epidemiol Rev*. <https://doi.org/10.1093/aje/kwac037>
- Schahn J, Damian M, Schurig U, Fücksle C (1999) Konstruktion und Evaluation der dritten Version des Skalensystems zur Erfassung des Umweltbewusstseins (SEU-3). Psychologisches Institut der Universität Heidelberg, Heidelberg
- Semenzato P, Bortolini L (2023) Urban heat island mitigation and Urban green spaces: testing a model in the city of Padova (Italy). *Land* 12(2):476. <https://doi.org/10.3390/land12020476>
- Shen Y, de Hoogh K, Schmitz O, Clinton N, Tuxen-Bettman K, Brandt J et al (2022) Europe-wide air pollution modeling from 2000 to 2019 using geographically weighted regression. *Environ Int* 168:107485. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107485>
- Shrestha BB, Perera EDP, Kudo S, Miyamoto M, Yamazaki Y, Kuribayashi D et al (2019) Assessing flood disaster impacts in agriculture under climate change in the river basins of Southeast Asia. *Nat Hazards* 97(1):157–192. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03632-1>
- Skeie RB, Peters GP, Fuglestad J, Andrew R (2021) A future perspective of historical contributions to climate change. *Clim Change* 164(1):24. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-02982-9>
- Smith CJ, Forster PM, Allen M, Leach N, Millar RJ, Passerello GA, Regayre LA (2018) FAIR v1.3: a simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. *Geosci Model Dev* 11(6):2273–2297. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2273-2018>
- Statistisches Bundesamt (2021a) Ökosystemgesamtrechnungen: Methode der Flächenbilanzierung der Öko-systeme. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/oekosystemgesamtrechnungen/Publikationen/Downloads/methode-flaechenbilanzierung-oekosysteme-5852201189004.pdf?__blob=publication. Zugegriffen: 13. März 2023
- Statistisches Bundesamt (2021b) Ökosystemgesamtrechnungen: Nationale Ökosystemklassifikation. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/oekosystemgesamtrechnungen/Publikationen/Downloads/nationale-oekosystemklassifikation-5852205219004.pdf?__blob=publicationFile. Zugegriffen: 13. März 2023
- Statistisches Bundesamt (2023) Indikatoren der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. <http://dns-indikatoren.de/>. Zugegriffen: 9. März 2023
- Stern PC (2000) Toward a coherent theory of environmentally significant behavior. *J Social Issues* 56(3):407–424. <https://doi.org/10.1111/0022-4537.00175>

- Stone D, Auffhammer M, Carey M, Hansen G, Huggel C, Cramer W et al (2013) The challenge to detect and attribute effects of climate change on human and natural systems. *Clim Change* 121(2):381–395. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0873-6>
- Stott PA, Christidis N, Otto FEL, Sun Y, Vanderlinden J-P, van Oldenborgh GJ et al (2016) Attribution of extreme weather and climate-related events. *Wires Clim Chang* 7(1):23–41. <https://doi.org/10.1002/wcc.380>
- Syrbe R-U, Schorcht M, Grunewald K, Meinel G (2018) Indicators for a nationwide monitoring of ecosystem services in Germany exemplified by the mitigation of soil erosion by water. *Ecol Indic* 94:46–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.035>
- Tradowsky JS, Philip SY, Kreienkamp F, Kew SF, Lorenz P, Arrighi J et al (2023) Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Clim Change* 176(7):90. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03502-7>
- Umweltbundesamt (2004) Chronischer Lärm als Risikofaktor für den Myokardinfarkt, Ergebnisse der „NaRoMI“-Studie. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/chronischer-laerm-als-risikofaktor-fuer-den>. Zugriffen: 14. März 2023
- United Nations (1992) Convention on biological diversity. <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>. Zugriffen: 13. März 2023
- United Nations et al (2021) System of environmental-economic accounting—ecosystem accounting (SEEA EA). <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>. Zugriffen: 13. März 2023
- United Nations et al (2014) System of environmental-economic accounting 2012—central framework
- Venter ZS, Krog NH, Barton DN (2020) Linking green infrastructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. *Sci Total Environ* 709:136193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136193>
- Vereinte Nationen (2016) Ziele für nachhaltige Entwicklung. Bericht 2016. <https://www.un.org/depts/german/millennium/SDG%20Bericht%202016.pdf>. Zugriffen: 9. März 2023
- Vereinte Nationen (2017) Ziele für nachhaltige Entwicklung. Bericht 2017. <https://www.un.org/depts/german/millennium/SDG%20Bericht%202017.pdf>. Zugriffen: 9. März 2023
- Vereinte Nationen (2022) Kunming-Montreal global biodiversity framework. <https://www.cbd.int/doc/c/e6d3/cd1d/daf663719a03902a9b116c34/cop-15-l-25-en.pdf>. Zugriffen: 9. März 2023
- Von Storch H, Zwiers FW (2002) Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press, Cambridge
- Wackernagel H (2010) Multivariate geostatistics: an introduction with applications, 3. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg
- Weber KA, Yang W, Lyons E, Stevenson DK, Padula AM, Shaw GM (2021) Greenspace, air pollution, neighborhood factors, and preeclampsia in a population-based case-control study in California. *IJERPH* 18(10):5127. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105127>
- WEF (2024) The global risks report 2024. 19th edition. https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf. Zugriffen: 17. Nov. 2024
- WHO (2021) WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. Zugriffen: 14. März 2023
- Wilks DS (2019) Statistical methods in the atmospheric sciences, 4. Aufl. Academic Press, Elsevier
- Woegel M, Pickford R, Schneider AE (2019) Umweltepidemiologie. In: Wichmann HE, Fromme H (Hrsg) Handbuch der Umweltmedizin. Erg.Lfg., ecomed Medizin, Landsberg, S 63
- Yang X, Xu X, Wang Y, Yang J, Wu X (2024) Heat exposure impacts on urban health: a meta-analysis. *Sci Total Environ* 947:174650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174650>
- Zalakeviciute R, Mejia D, Alvarez H, Bermeo X, Bonilla-Bedoya S, Rybarczyk Y, Lamb B (2022) War impact on air quality in Ukraine. *Sustainability* 14(21):13832. <https://doi.org/10.3390/su142113832>
- Zanger L, Bücher A, Kreienkamp F, Lorenz P, Tradowsky JS (2024) Regional pooling in extreme event attribution studies: an approach based on multiple statistical testing. *Extremes* 27(1):1–32
- Žuveša-Aloise M, Koch R, Buchholz S, Früh B (2016) Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Clim Change* 135:425–438. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2>

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

Affiliations

✉ Katja Ickstadt · Christina Elmer · Roland Fried · Andreas Groll
Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland
E-Mail: ickstadt@statistik.tu-dortmund.de

Susanne Breitner-Busch · Helmut Küchenhoff · Walter J. Radermacher
Ludwig-Maximilians-Universität München, München, Deutschland

Susanne Breitner-Busch · Kathrin Wolf
Helmholtz Zentrum München, München, Deutschland

Andreas Diekmann
ETH Zürich, Zürich, Schweiz

Andreas Diekmann · Heinz Leitgöb
Universität Leipzig, Leipzig, Deutschland

André Conrad
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland

Christina Elmer
Netzwerk Recherche e. V., Berlin, Deutschland

Simon Felgendreher · Simon Schürz
Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland

Roland Fried
Deutsche Statistische Gesellschaft (DStatG), Augsburg, Deutschland

Sarah Friedrich
Universität Augsburg, Augsburg, Deutschland

Kateryna Fuks
Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, Deutschland

Andreas Hense
Universität Bonn, Bonn, Deutschland

Claudia Hornberg
Universität Bielefeld, Bielefeld, Deutschland

Helmut Küchenhoff
Deutsche Arbeitsgemeinschaft Statistik (DAGStat), Dortmund, Deutschland

Heinz Leitgöb
Goethe Universität Frankfurt, Frankfurt, Deutschland

Sektion Methoden der empirischen Sozialforschung der DGS, Dresden, Deutschland

Friederike Paetz

Hochschule Anhalt, Bernburg, Deutschland

Gesellschaft für Klassifikation e. V., Bremen, Deutschland

Walter J. Radermacher

Federation of European Statistical National Societies (FENStatS), Belvaux, Luxemburg