

DAGStat-Stellungnahme zum Thema “Umweltstatistik”

Δ (Statistik + Umweltpolitik)

Beschleunigung umweltpolitischer Entscheidungen durch verlässliche Daten und effiziente statistische Methoden

Version 16.03.2023

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 gesundheitlichen Auswirkungen 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 Fakten und verlässliche Methoden. Nur so lässt sich verwirklichen, was notwendig ist.

Diese Stellungnahme beschreibt den aktuellen Wissensstand und zentrale Methoden in fünf wesentlichen Bereichen der Umweltstatistik. Wie lassen sich die Leistungen der Ökosysteme für den Menschen beziffern, wie wirken Umweltfaktoren auf die Gesundheit? Was beeinflusst das Bewusstsein für und die Akzeptanz von Umweltmaßnahmen? Wie lassen sich Wege zur Eindämmung der Klimakrise evidenzbasiert entwickeln und bewerten? Und welche Daten müssen für die genannten Fragestellungen erhoben und verknüpft werden?

Die Autorinnen und Autoren dieses Papiers führen ihre Expertise aus unterschiedlichen Fachgebieten der Umweltstatistik zusammen und liefern in den Kapiteln den wissenschaftlichen Kontext für aktuelle Entwicklungen und drängende Entscheidungen. Sie stellen zudem zehn besonders relevante statistische Methoden aus dem Bereich der Umweltstatistik vor – als Wissensressource und Anknüpfungspunkte für den interdisziplinären Austausch. Drei Forderungen an die Politik kondensieren schließlich dringende Bedarfe, die sich aus der umweltstatistischen Forschung ergeben und nur mithilfe staatlicher Regelungen umgesetzt werden können.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Umweltepidemiologie	5
3. Umwelthandeln	13
4. Ökosysteme	17
5. Klimawandel	22
6. Daten	26
7. Was jetzt zu tun ist	28
8. Die 10 wichtigsten Methoden	29
Autorenliste (Gesamtdokument)	33
Autorenliste (Ausgewählte Kapitel)	33

1. Einleitung

Im zurückliegenden Winter 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 zudem Temperatur und Beleuchtung reduziert. Zwar waren diese Maßnahmen nicht ausschließlich auf den Schutz der Umwelt ausgerichtet, sollten sie doch häufig schlicht Kosten reduzieren und eine Mangellage verhindern. Dennoch hatte das Sparen klare positive Auswirkungen auf Energiebilanzen und Emissionen. Die beschriebene Reaktion steht damit exemplarisch für Adaptionseffekte im Bereich der Umweltwirkungen.

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 Abbildung 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 Umweltwirkungen sind infolge des Angriffskriegs Russlands in der Ukraine zu beobachten. Einerseits als 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. Hinzu kommen die ökonomischen Kriegsfolgen im Energiesektor, die unterschiedliche Reaktionen in wirtschaftlichen Sektoren und gesellschaftlichen Bereichen nach sich ziehen. Und 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. 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 (z. B. WEF 2023). 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 Abbildung 2). Im Jahr 2022 bewerteten internationale Forscherteams gleich zwei neue Grenzen als überschritten: So habe die Menschheit den sicheren Handlungsraum nicht mehr nur hinsichtlich des Klimawandels, der Intaktheit der Biosphäre, biogeochemischer Flüsse und der Landnutzung verlassen – auch im Bereich des Süßwassers, neuer Substanzen und modifizierter Lebensformen sei die Lage nun als kritisch zu bewerten.

Wir stehen folglich vor immensen Herausforderungen und notwendigen Transformationen in großen Bereichen des Wirtschaftens, des Lebens und Zusammenlebens. Damit ist die Umweltstatistik mehr als

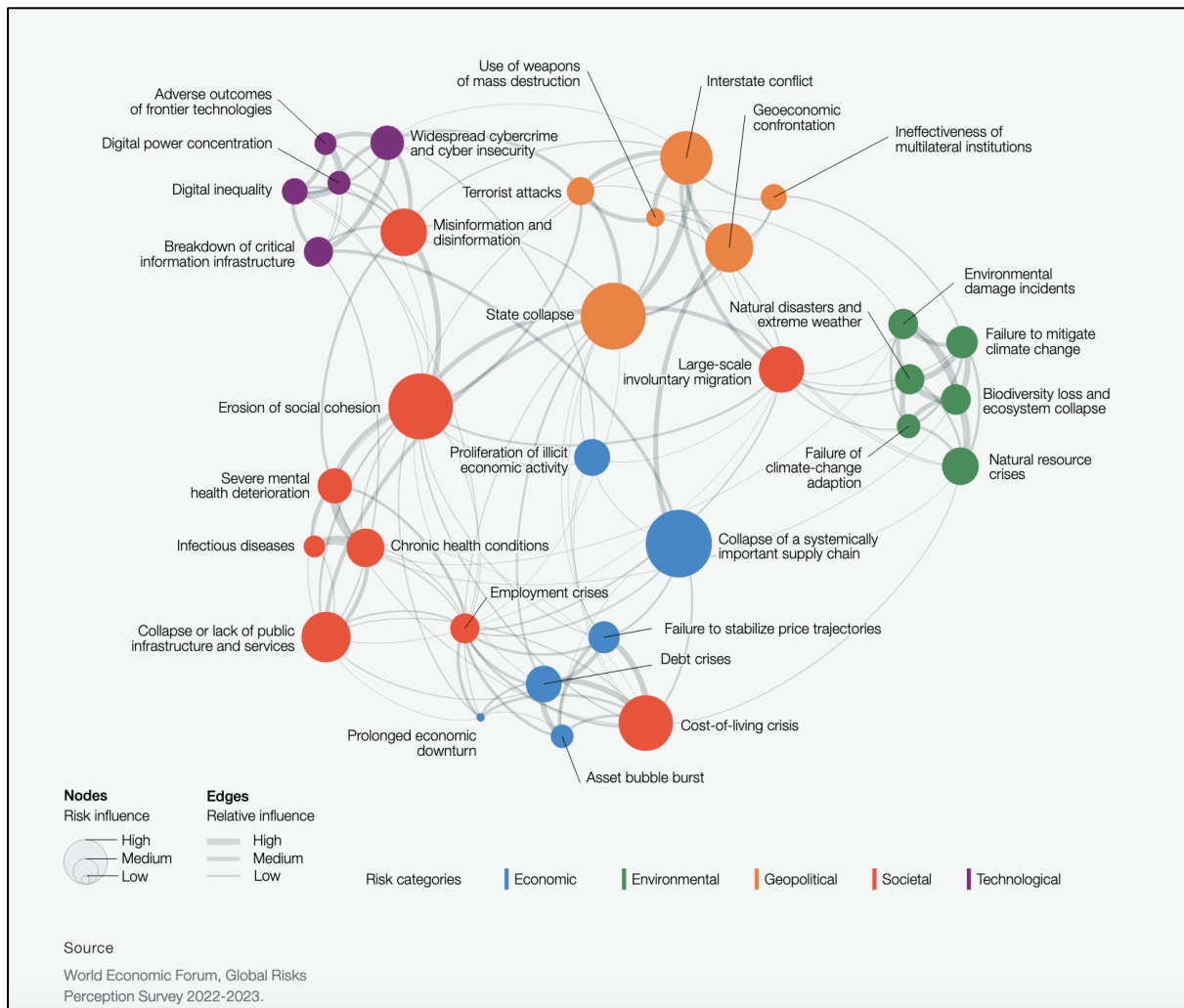


Abb. 1 Globale Risiken und ihre Verbindungen (Quelle: WEF, 2023, S. 10)

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. 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 Monitoring und die Weiterentwicklung dieser Nachhaltigkeitsindikatoren begleitet das Statistische Bundesamt 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

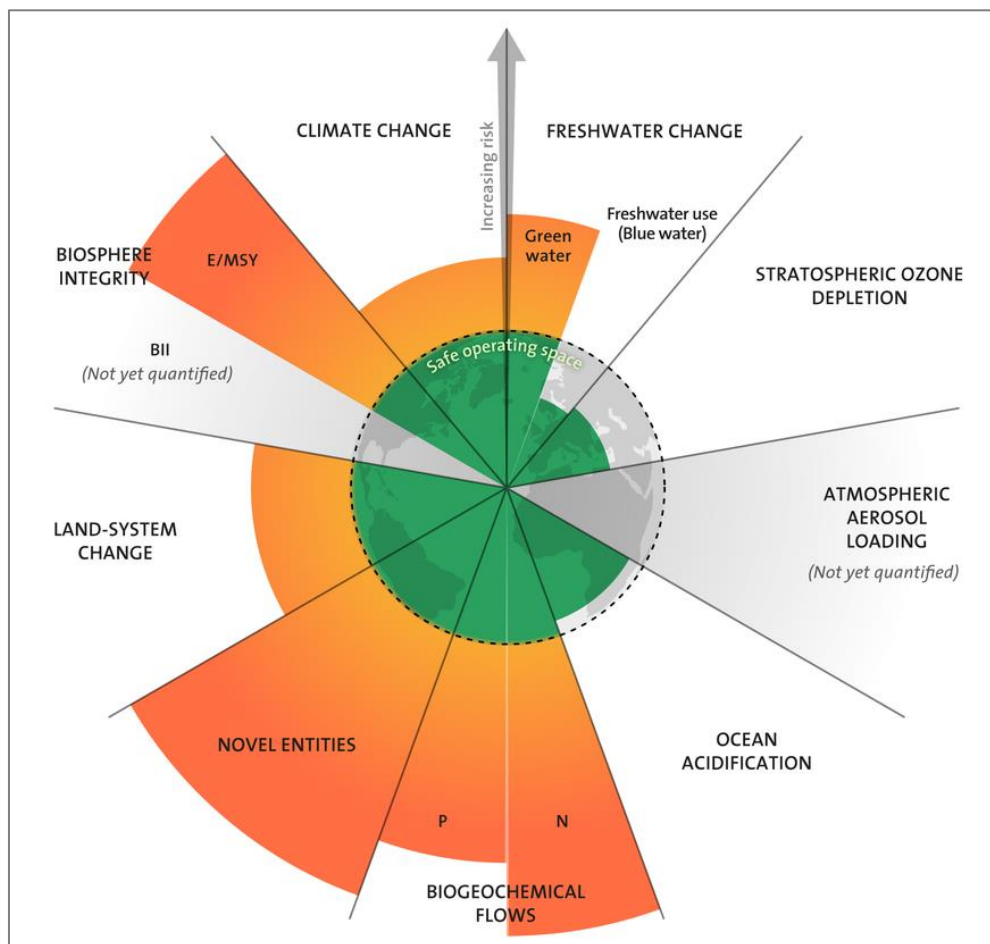


Abb. 2 Planetare Grenzen (Update 2022) (Quelle: PIK 2022)

von 2019 und das sogenannte Europäische Semester mit einer umfangreichen Datenanalyse steht (Europäische Kommission o. D.). 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 Prozent 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 gehört beispielsweise der Indikator „Ökosystemleistungen“ (B.1), der sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen soll, darunter der Anteil der Gewässer mit guter Wasserqualität, die Feinstaubbelastung in Städten sowie Naturkatastrophen und ihre Auswirkungen auf die Bevölkerung.

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 Ökosystemgesamtrechnungen 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 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 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.

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 dieser Stellungnahme.

Literatur Einleitung

Bar, H. (2021). COVID-19 lockdown: Animal life, ecosystem, and atmospheric environment. *Environment, Development & Sustainability*, 23(6), 8161–8178. doi: 10.1007/s10668-020-01002-7

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2022). Montreal Moment für die Natur. URL: <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/montreal-moment-fuer-die-natur> (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023). Jahreswirtschaftsbericht 2023. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/jahreswirtschaftsbericht-2023.pdf> (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Eppler, E. (1975). Ende oder Wende. Von der Machbarkeit des Notwendigen. Stuttgart, Berlin, Köln und Mainz.

Europäische Kommission (o.D.). Ganzheitlicher EU-Ansatz für nachhaltige Entwicklung. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/international-strategies/sustainable-development-goals/eu-holistic-approach-sustainable-development_de (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Gellrich, A., Burger, A., Tews, K., Simon, C., & Seider, S. (2021). 25 Jahre Umweltbewusstseinsforschung im Umweltressort. Langfristige Entwicklungen und aktuelle Ergebnisse. Umweltbundesamt. URL:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_hgp_umweltbewusstseinsstudie_bf.pdf (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Kahn, I., Shah, D., & Shah, S. S. (2021). COVID-19 pandemic and its positive impacts on environment: An updated review. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 18(), 521–530. doi: 10.1007/s13762-020-03021-3

Lawrence, M. J., Stemberger, H. L. J., Zolderdo, A. J., Struthers, D. P., & Cooke, S. J. (2015). The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment. *Environmental Reviews*, 23(4), 443–460. doi: 10.1139/er-2015-0039

Mousazadeh, M., Paital, B., Naghdali, Z., Mortezaian, Z., Hashemi, M., Niaragh, E. K., ..., & Emamjomeh, M. M. (2021). Positive environmental effects of the coronavirus 2020 episode: A review. *Environment, Development & Sustainability*, 23(9), 12738–12760. doi: 10.1007/s10668-021-01240-3

Naseer, S., Wei, Z., Aslam, M. S., & Naseer, S. (2022). A mini-review: Positive impact of COVID-19 on arial health and ecology. *Environmental Science & Pollution Research*, 29(27), 40520–40530. doi: 10.1007/s11356-022-19961-x

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2022). Zukunftsreport Wissenschaft. Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel. Halle (Saale).

Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837, 155865. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155865

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2022). Update planetare Grenzen: Grenze für Süßwasser überschritten. URL: <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/update-planetare-grenzen-suesswasser-grenze-ueberschritten> (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Ray, R. L., Singh, V. P., Singh, S. K., Acharya, B. S., & He, Y. (2022). What is the impact of COVID-19 pandemic on global carbon emissions? *Science of the Total Environment*, 816, 151503. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151503

Statistisches Bundesamt (2023). Indikatoren der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. URL: <http://dns-indikatoren.de/> (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Vereinte Nationen (2016). Ziele für nachhaltige Entwicklung. Bericht 2016. URL: <https://www.un.org/depts/german/millennium/SDG%20Bericht%202016.pdf> (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Vereinte Nationen (2017). Ziele für nachhaltige Entwicklung. Bericht 2017. URL: <https://www.un.org/depts/german/millennium/SDG%20Bericht%202017.pdf> (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

Vereinte Nationen (2022). Kunming-Montreal Global biodiversity framework. URL: <https://www.cbd.int/doc/c/e6d3/cd1d/daf663719a03902a9b116c34/cop-15-l-25-en.pdf> (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

World Economic Forum (WEF) (2023). The Global Risks Report 2023. 18th Edition. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf (zuletzt aufgerufen am 9.3.2023)

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. doi: 10.3390/su142113832

2. Umweltepidemiologie

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). Der Aktionsplan folgt der „Null-Schadstoff-Vision für 2050“, die Verschmutzung so weit zu reduzieren, „dass sie für die menschliche Gesundheit und die natürlichen Ökosysteme keine Gefahr mehr darstellt.“ (Europäische Kommission o. D.). Neben der mit

dem Aktionsplan adressierten Umweltverschmutzung stellen auch der Verlust an Biodiversität und der Klimawandel zentrale planetare Krisen dar, die auch für die menschliche Gesundheit eine gravierende Bedrohung darstellen.

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 die urbanen Grün- und Wasserflächen, Fußgänger- und Fahrradfreundlichkeit des Wohnortes stehen vor allem gesundheitsschädliche Umweltfaktoren 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 polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) (z. B., Hölzer et al. 2008, Rathjens et al. 2021).

In diesem Kapitel legen wir einen Schwerpunkt auf Schadstoffe in der Luft. 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).

In der EU wird die Luftqualität durch die EU-Luftqualitätsrichtlinie (Europäische Kommission 2008) geregelt. Sie legt Grenz- und Zielwerte für Luftschadstoffe wie Feinstaub (PM_{2.5}, PM₁₀), Stickstoffdioxid (NO₂), bodennahes Ozon (O₃) u.a. auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse und technischer Umsetzbarkeit fest. Aktuelle Europa- und weltweite Informationen zu diesen Schadstoffen sind u. a. durch den Copernicus Atmosphere Monitoring Service CAMS verfügbar (<https://atmosphere.copernicus.eu/>). Die definierten Grenzwerte der EU-Luftqualitätsrichtlinie sollen regelmäßig überprüft und angepasst werden, um sicherzustellen, dass sie den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen entsprechen. 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 (Europäische Kommission 2019b).

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, z. B. die neueste Fassung der Luftqualitätsleitlinien (Air Quality Guidelines (AQG)) zum Schutz der öffentlichen Gesundheit (WHO 2021). Die Luftqualitätsleitlinien der WHO 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 Luftqualitätsleitlinien der WHO stützen sich primär auf umweltepidemiologische Studien.

Die Festlegung von umweltpolitischen Grenzwerten ist in der Regel ein Kompromiss zwischen Erkenntnissen aus umweltepidemiologischen Studien und der Machbarkeit der Schadstoffminderungen. So wurde in der EU-Luftqualitätsrichtlinie der Grenzwert von 25 µg/m³ im Jahresmittel für PM_{2.5} für den Zeitraum von 2008 bis 2015 als Zielwert eingeführt, galt aber erst ab 2015 als bindender Grenzwert. Im Zuge der aktuellen Novellierung der Richtlinie wird von der EU-Kommission ein im Vergleich dazu mehr als halbiertes Grenzwert von 10 µg/m³ vorgeschlagen, der jedoch den 2021 angepassten AQG der WHO von 5 µg/m³ deutlich übersteigt.

Studientypen

Epidemiologische Beobachtungsstudien 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 Expositionsniveau kontinuierlich erfasst und bewertet (Woeckel et al. 2019). Die Exposition wird in einer Kohortenstudie damit vor dem Auftreten der Erkrankung erfasst, was eine Beurteilung der Kausalität 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. Ackermann-Liebrich et al. 1997; Hoffmann et al. 2007; Krämer et al. 2010; Wolf et al. 2015), aber auch große multizentrische Kohortenstudien wie z. B. ESCAPE (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects; Raaschou-Nielsen et al. 2013; Beelen et al. 2014) und ELAPSE (Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe; Brunekreef et al. 2021) eine wichtige Evidenzbasis über die Auswirkungen von Luftschadstoffen (vor allem auch im Niedrigdosis-Bereich) und Lärm (Fu et al. 2022; Roswall et al. 2021 Tobollik et al. 2019) auf die Gesundheit geliefert.

Eine Kohortenstudie verfügt häufig über ein großes Studienkollektiv mit tausenden Teilnehmenden. Damit ist eine direkte Erfassung der Exposition durch Messungen für die gesamte Studienpopulation meist nicht sinnvoll durchführbar. 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 die europaweiten Luftschadstoffmodelle des ELAPSE Projekts 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.

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. 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; die kontemporäre Exposition ist möglicherweise für die Erkrankung nicht ätiologisch relevant und das Verzerrungsrisiko ist 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 Querschnittstudien neben Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien in den modernen Evidenzsynthesemethoden eine Rolle. Häufig wird Umweltstatistik in Querschnittstudien für die Expositionsbestimmung genutzt; so wurden z. B. in einem Scoping Review zum Klimawandel und psychischer Gesundheit 14 Querschnittstudien eingeschlossen, in die Umweltstatistiken wie z. B. meteorologische Daten eingeflossen sind (Charlson et al. 2021).

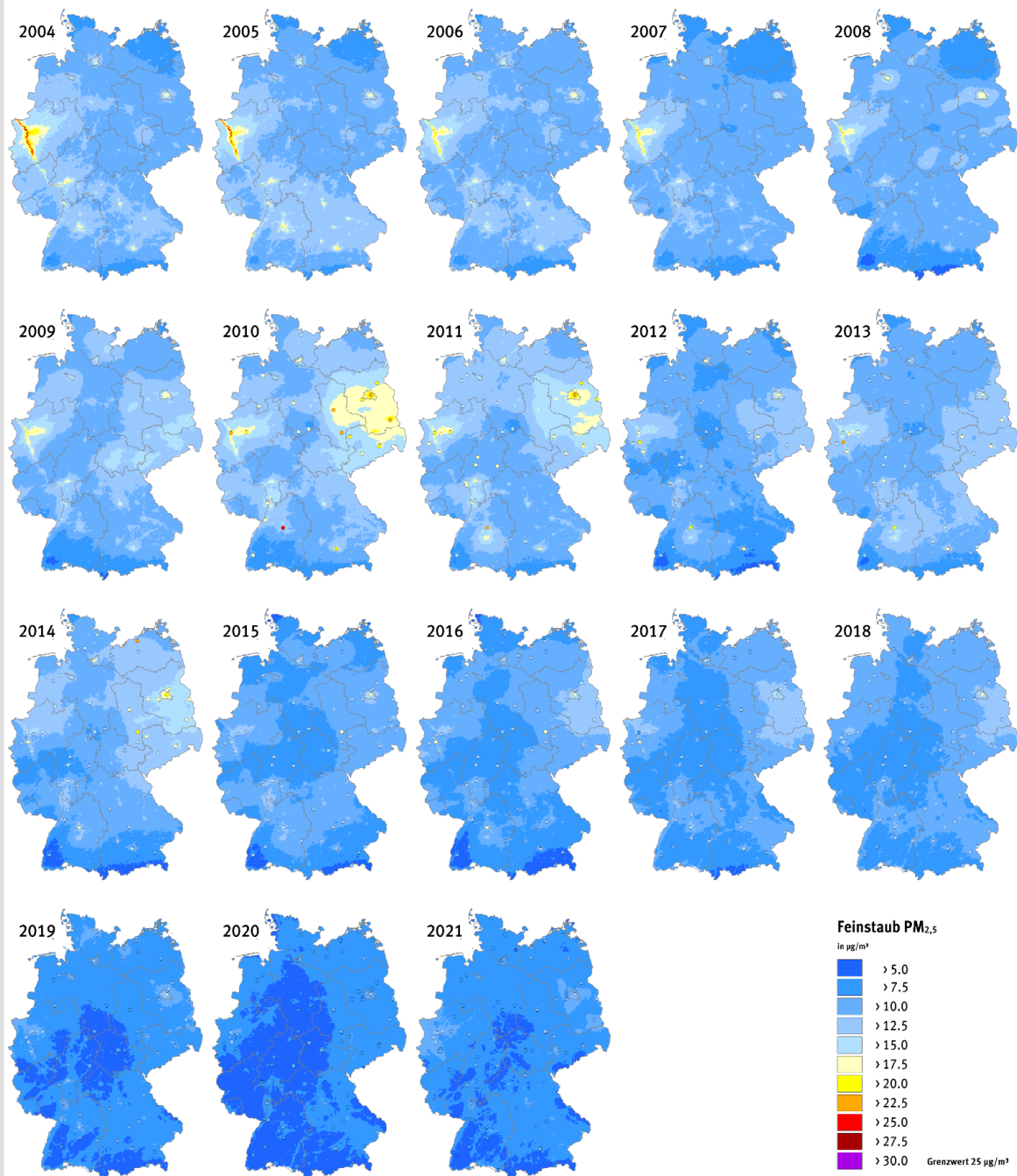
Um die Auswirkungen kurzfristiger Erhöhungen einer Exposition gegenüber einem Umweltfaktor zu untersuchen, werden **Zeitreihenanalysen, Case-Crossover-Studien oder Panel-Studien** durchgeführt. Gerade letztere sind besonders geeignet zur Erforschung physiologischer Vorgänge und Stoffwechselwege. Diese 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 der Luftverschmutzung und dem Schweregrad der COVID-19 Erkrankung untersucht (z. B. Pozzer et al. 2020; Prinz und Richter 2022).

Expositionsermittlung

Die Expositionsermittlung nimmt in umweltepidemiologischen Studien eine zentrale Rolle ein, da sie für die Berechnung der Expositions-Wirkungs-Beziehungen benötigt wird. Dabei spielen umweltstatistische Daten im Kontext der Epidemiologie, Toxikologie, Medizin und den Umwelt- oder auch Sozialwissenschaften eine besondere Rolle. 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 Abbildung 3 sind beispielhaft über jeweils ein Jahr gemittelte Feinstaubkonzentrationen (PM2.5) dargestellt. Mit Hilfe dieser umweltstatistischen Informationen auf Basis meist zeitlich oder räumlich bezogener Messungen und Modellierungen wird eine Schätzung der individuellen Exposition gegenüber Umweltstressoren wie z. B. Luftschadstoffen möglich.

Feinstaub (PM_{2,5}) - Jahresmittelwerte



① Punktuell hohe Belastungen, die bezüglich des gewählten Kartenmaßstabes nicht flächenrepräsentativ sind, wurden zusätzlich eingefügt und durch Farbkreise gekennzeichnet ("Spot"-Darstellung).

Abb. 3: Feinstaub (PM_{2,5})-Jahresmittelwerte - Konzentrationskarten aus Kombination von Modellrechnungen und Messungen (Quelle: Umweltbundesamt 09/2022)

Häufig wird die Exposition in epidemiologischen Studien mit Hilfe statistischer Modelle geschätzt, z. B. für die Luftschadstoffe anhand von Landnutzungsmodellen (de Hoog 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). Die zeitlich-räumlichen Auflösungen der Modelle sind dabei sehr unterschiedlich, variieren 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). 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).

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. Dazu 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 Zielwert, 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.

Literatur Umweltepidemiologie

Ackermann-Lieblich, U., Leuenberger, P., Schwartz, J., Schindler, C., Monn, C., Bolognini, G., ..., & Zemp, E. (1997). Lung function and long term exposure to air pollutants in Switzerland. Study on Air Pollution and Lung Diseases in Adults (SAPALDIA) Team. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 155(1), 122–129. doi: [ajrccm.155.1.9001300](https://doi.org/10.1164/ajrccm.155.1.9001300)

Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen, Z. J., Weinmayr, G., Hoffmann, B., ..., & Hoek, G. (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 (London, England)*, 383(9919), 785–795. doi: [10.1016/S0140-6736\(13\)62158-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62158-3)

Brunekreef, B., Strak, M., Chen, J., Andersen, Z. J., Atkinson, R., Bauwelinck, M., ..., & Hoek, G. (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. *Research report (Health Effects Institute)*, (208), 1–127.

Charlson F., Ali S., Benmarhnia T., Pearl M., Massazza A., Augustinavicius J., Scott J. G. (2021). Climate Change and Mental Health: A Scoping Review. *Int J Environ Res Public Health*. Apr 23;18(9):4486. doi: [10.3390/ijerph18094486](https://doi.org/10.3390/ijerph18094486). PMID: 33922573; PMCID: PMC8122895

Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., ..., & Doll, R. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ (Clinical research ed.)*, 330(7485), 223. doi: [10.1136/bmj.38308.477650.63](https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63)

de Hoogh, K., Chen, J., Gulliver, J., Hoffmann, B., Hertel, O., Ketzel, M., ..., & Hoek, G. (2018). Spatial PM_{2.5}, NO₂, O₃ and BC models for Western Europe - Evaluation of spatiotemporal stability. *Environment international*, 120, 81–92. doi: [10.1016/j.envint.2018.07.036](https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.036)

Ebel A., Memmesheimer M., Jakobs H. J. & Feldmann H. (2007). Advanced air pollution models and their application to risk and impact assessment. In: Air, Water and Soil Quality Modelling for Risk and Impact Assessment (Ebel A, Davitashvili T, eds). Amsterdam:IOS Press/Dordrecht, the Netherlands:Springer, 83–92.

Europäische Kommission (2008). 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). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050> (zuletzt aufgerufen am 14.03.2023)

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. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (zuletzt aufgerufen am 14.3.2023)

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. SWD (2019) 427 final. Brussels, 28.11.2019. Commission Staff Working Document Executive summary. Geneva: World Health Organization; License: CC BY-NC-SA3.0 IGO.

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'. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0400&qid=1623311742827> (zuletzt aufgerufen am 14.3.2023)

Europäische Kommission (2023). 2050 long-term strategy: URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en

Europäische Kommission (o. D.). Null-Schadstoff-Aktionsplan Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden. URL: https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_de#:~:text=Nach%20der%20Null%2DSchadstoff%2DVision,eine%20schadstofffreie%20Umwelt%20geschaffen%20wird. (zuletzt aufgerufen am 14.3.2023)

Fu W., Liu Y., Yan S., Wen J., Zhang J., Zhang P. & Zou L. (2022). The association of noise exposure with stroke incidence and mortality: A systematic review and dose-response meta-analysis of cohort studies. Environ Res. 2022 Dec;215(Pt 1):114249. doi: 10.1016/j.envres.2022.114249

Georgy, S., Lautenbach, S., Jahn, H.J., Katzschner, L., & Krämer, A. (2019). Erfassung von hitze- und feinstaubbedingten Gesundheitsrisiken in Deutschland: Ein epidemiologischer Studienansatz. Bundesgesundheitsbl 62, 782–791. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02960-8>

Hammer, M. S., van Donkelaar, A., Li, C., Lyapustin, A., Sayer, A. M., Hsu, N. C., ..., & Martin, R. V. (2020). Global Estimates and Long-Term Trends of Fine Particulate Matter Concentrations (1998–2018). Environmental science & technology, 54(13), 7879–7890. doi: 10.1021/acs.est.0c01764

Hennig, F., Sugiri, D., Tzivian, L., Fuks, K., Moebus, S., Jöckel, K.-H., ..., & Hoffmann, B. (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>

Hoffmann B, Moebus S, Möhlenkamp S, Stang A, Lehmann N, Dragano N, ... ,& Jöckel KH (2007). Heinz Nixdorf Recall Study Investigative Group. Residential exposure to traffic is associated with coronary atherosclerosis. Circulation. 116(5):489-96. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.693622 PMID: 17638927

Hölzer, J., Midasch, O., Rauchfuss, K., Kraft, M., Reupert, R., Angerer, J., ..., & Wilhelm, M. (2008). Biomonitoring of perfluorinated compounds in children and adults exposed to perfluorooctanoate-contaminated drinking water. Environmental health perspectives, 116(5), 651–657. doi: 10.1289/ehp.11064

- 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. *Environmental health perspectives*, 118(9), 1273–1279. doi: 10.1289/ehp.0901689
- Nonnemacher, M., Jakobs, H., Viehmann, A., Vanberg, I., Kessler, C., Moebus, S., ..., & Memmesheimer, B. (2014). Spatio-temporal modelling of residential exposure to particulate matter and gaseous pollutants for the Heinz Nixdorf Recall Cohort. *Atmospheric Environment*, 91, 15-23. doi: 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/Evaluation of area-related air quality data in Germany from chemistry-transport modelling. *Gefahrstoffe*, 80 (07-08), 281-290. doi: 10.37544/0949-8036-2020-07-08
- Orban, E., McDonald, K., Sutcliffe, R., Hoffmann, B., Fuks, K. B., Dragano, N., ..., & Moebus, S. (2016). Residential Road Traffic Noise and High Depressive Symptoms after Five Years of Follow-up: Results from the Heinz Nixdorf Recall Study. *Environmental health perspectives*, 124(5), 578–585. doi: 10.1289/ehp.1409400
- Pitchika, A., Hampel, R., Wolf, K., Kraus, U., Cyrus, J., Babisch, W., ..., & Schneider, A. (2017). Long-term associations of modeled and self-reported measures of exposure to air pollution and noise at residence on prevalent hypertension and blood pressure. *The Science of the total environment*, 593-594, 337–346. doi: 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. *Cardiovascular research*, 116(14), 2247–2253. doi: 10.1093/cvr/cvaa288
- Prinz, A. L., & Richter, D. J. (2022). Long-term exposure to fine particulate matter air pollution: An ecological study of its effect on COVID-19 cases and fatality in Germany. *Environmental research*, 204(Pt A), 111948. doi: 10.1016/j.envres.2021.111948
- Raaschou-Nielsen, O., Andersen, Z. J., Beelen, R., Samoli, E., Stafoggia, M., Weinmayr, G., ..., & Hoek, G. (2013). Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *The Lancet. Oncology*, 14(9), 813–822. doi: 10.1016/S1470-2045(13)70279-1
- 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. doi: 10.1007/s00477-020-01932-8
- Röhl, C. & Kolossa-Gehring, M. (2022). Human-Biomonitoring – ein wichtiger Baustein zur Umsetzung der EU-Chemikalienstrategie. *Die Arbeit der Human-Biomonitoring-Kommission am Umweltbundesamt. Bundesgesundheitsbl*, 65, 849–852. doi: 10.1007/s00103-022-03579-y
- Roswall, N., Pyko, A., Ögren, M., Oudin, A., Rosengren, A., Lager, A., ..., & Sørensen, M. (2021). Long-Term Exposure to Transportation Noise and Risk of Incident Stroke: A Pooled Study of Nine Scandinavian Cohorts. *Environmental health perspectives*, 129(10), 107002. doi: 10.1289/EHP8949
- Savitz, D. A., & Wellenius, G. A. (2022). Can Cross-Sectional Studies Contribute to Causal Inference? It Depends. *American journal of epidemiology*, kwac037. Advance online publication. doi: 10.1093/aje/kwac037
- Shen, Y., de Hoogh, K., Schmitz, O., Clinton, N., Tuxen-Bettman, K., Brandt, J., ..., & Hoek, G. (2022). Europe-wide air pollution modeling from 2000 to 2019 using geographically weighted regression. *Environment international*, 168, 107485. doi: 10.1016/j.envint.2022.107485
- Tobollik, M., Hintzsche, M., Wothge, J., Myck, T., & Plass, D. (2019). Burden of Disease Due to Traffic Noise in Germany. *International journal of environmental research and public health*, 16(13), 2304. doi: 10.3390/ijerph16132304. Erratum in: *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Jul 22;19(15).

Umweltbundesamt (2004). Chronischer Lärm als Risikofaktor für den Myokardinfarkt, Ergebnisse der "NaRoMI"-Studie. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) Chronischer Lärm als Risikofaktor für den Myokardinfarkt, Ergebnisse der "NaRoMI"-Studie. WaBoLu-Hefte 02/04, S. I-1 bis I-59. Umweltbundesamt, Berlin. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/chronischer-laerm-als-risikofaktor-fuer-den> (zuletzt aufgerufen am 14.03.2023)

van Donkelaar, A., Martin, R. V., Li, C., & Burnett, R. T. (2019). Regional Estimates of Chemical Composition of Fine Particulate Matter Using a Combined Geoscience-Statistical Method with Information from Satellites, Models, and Monitors. *Environmental science & technology*, 53(5), 2595–2611. doi: 10.1021/acs.est.8b06392

Weber, K. A., Yang, W., Lyons, E., Stevenson, D. K., Padula, A. M., & Shaw, G. M. (2021). Greenspace, Air Pollution, Neighborhood Factors, and Preeclampsia in a Population-Based Case-Control Study in California. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5127. doi: 10.3390/ijerph18105127

Woeckel, M., Pickford, R. & Schneider, A.E. (2019). Umweltepidemiologie. In: Wichmann H. E., Fromme H. (Hrsg): Handbuch der Umweltmedizin, Kap. III-1.2, 63. Erg.Lfg., ecomed Medizin, Landsberg.

Wolf, K., Schneider, A., Breitner, S., Meisinger, C., Heier, M., Cyrus, J., ..., & KORA Study Group (2015). Associations between short-term exposure to particulate matter and ultrafine particles and myocardial infarction in Augsburg, Germany. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 218(6), 535–542. doi: 10.1016/j.ijheh.2015.05.002

World Health Organization (WHO) (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. (zuletzt aufgerufen am 14.03.2023) Lizenz: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

3. Umwelthandeln

Der Green Deal der EU sieht 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 Förderungen zur Gebäudesanierung, Installierung von Wärmepumpen, Anschaffung von E-Autos, Energieeinsparung usw. Wirkung zeigen, hängt ganz wesentlich 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: (i) „Einsicht in die Gefährdung“ als kognitive Komponente, (ii) „Bereitschaft zur Abhilfe“ als konative Komponente und (iii) 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 Langa (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 usw. 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 aber 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 usw. 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 usw. regelmäßig zu erheben. Die Ariadne-Studie (Levi et al. 2021) kommt dabei zu dem Ergebnis, dass im Verkehrsbereich „Pull-Maßnahmen“ (der Ausbau von Radwegen, die Förderung des ÖPNV usw.) 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 erfordert 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 (Itembatterien) entwickelt. Beispielsweise werden mit dem Sozio-oekonomischen Panel (SOEP) bereits seit 1984 wiederholt die Umweltsorgen der deutschen Bevölkerung erfasst (siehe Abbildung 4). 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. Abbildung 4 zeigt gegenläufige Entwicklungstendenzen zwischen Arbeitslosigkeit und Umweltsorgen auf der Aggregatebene. Details sind Hartmann und Preisendörfer (2021) zu entnehmen.

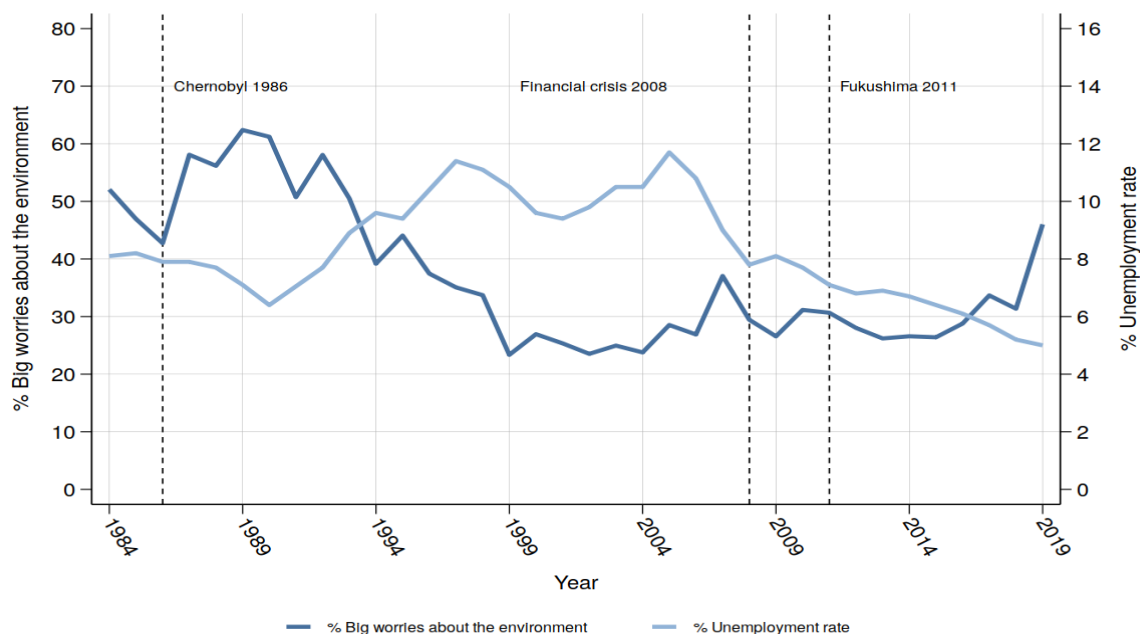


Abb. 4: Entwicklung der Umweltsorgen der deutschen Bevölkerung und der Arbeitslosenquote seit 1984 (Datenbasis: Sozio-oekonomisches Panel; Quelle: Hartmann & Preisendörfer 2021, S. 327, Figure 2)

Literatur Umwelthandeln

Andersen, H. K., & Mayerl, J. (2022). Is the effect of environmental attitudes on behavior driven solely by unobserved heterogeneity? *Kölner Zeitschrift für Soziologie & Sozialpsychologie*, 74(3), 381–408. doi: 10.1007/s11577-022-00855-2

Balderjahn, I., Peyer, M., & Klemm, A. (2015). Nachhaltiges Konsumbewusstsein: Validierung eines neuen Messansatzes anhand einer repräsentativen Online-Befragung. Nürnberg: GfK. https://www.nim.org/sites/default/files/medien/359/dokumente/2015_gfk_verein_nachhaltiges_konsumbewusstsein.pdf

Bamberg, S., & Möser, G. (2007). Twenty years after Hines, Hungerford, and Tomera: A new meta-analysis of psycho-social determinants of pro-environmental behavior. *Journal of Environmental Psychology*, 27(1), 14–25. doi: 10.1016/j.jenvp.2006.12.002

Bernauer, T., & McGrath, L. F. (2016). Simple reframing unlikely to boost public support for climate policy. *Nature Climate Change*, 6(7), 680–683. doi: 10.1038/nclimate2948

Bruderer Enzler, H., & Diekmann, A. (2019). All talk and no action? An analysis of environmental concern, income and greenhouse gas emissions in Switzerland. *Energy Research & Social Science*, 51, 12–19. doi: 10.1016/j.erss.2019.01.001

Carrington, M. J., Neville, B. A., & Whitwell, G. J. (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. *Journal of Business Ethics*, 97, 139–158. doi: 10.1007/s10551-010-0501-6

Diekmann, A., & Preisendörfer, P. (2001). *Umweltsoziologie. Eine Einführung*. Reinbek: Rowohlt.

Diekmann, A., & Preisendörfer, P. (2003). Green and greenback. The behavioral effects of environmental attitudes in low-cost and high-cost situations. *Rationality & Society*, 15(4), 441–472. doi: 10.1177/1043463103154002

- Dunlap, R. E., & van Liere, K. D. (1978). The "new environmental paradigm". *Journal of Environmental Education*, 9(4), 10–19. doi: 10.1080/00958964.1978.10801875
- Ester, P., & Van der Meer, F. (1982). Determinants of individual environmental behavior: An outline of a behavioral model and some research findings. *Netherlands' Journal of Sociology*, 18, 57–94.
- Gellrich, A., Burger A., Tews K., Simon C., Seider, S. 2021. 25 Jahre Umweltbewusstseinsforschung im Umweltressort. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_hgp_umweltbewusstseinsstudie_bf.pdf
- Hadler, M., Klösch, B., Schwarzing, S., Schweighart, M., Wardana, R. & Bird, D. N. (2022). Surveying climate-relevant behavior. Measurements, obstacles, and implications. Cham: Springer Nature/Palgrave Mc Millan.
- Hartmann, J., & Preisendörfer, P. (2021). Development and structure of environmental worries in Germany 1984-2019. *Zeitschrift für Soziologie*, 50(5), 322–337. doi: 10.1515/zfsocz-2021-0022
- Hines, J. M., Hungerford, H. R., & Tomera, A. N. (1987). Analysis and synthesis of research on responsible environmental behavior: A meta-analysis. *Journal of Environmental Education*, 18(2), 1–8. doi: 10.1080/00958964.1987.9943482
- Kaiser, F. G., & Lange, F. (2021). Offsetting behavioral costs with personal attitude: Identifying the psychological essence of an environmental attitude measure. *Journal of Environmental Psychology*, 75, 101619. doi: 10.1016/j.jenvp.2021.101619
- Levi, S., Wolf, I., Flachslund, C., Koch, N., Koller, F., & Edmonson, D. (2021). Klimaschutz und Verkehr: Zielerreichung nur mit unbequemen Maßnahmen möglich. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- Maloney, M. P., & Ward, M. P. (1973). Ecology: Let's hear from the people. An objective scale for the measurement of ecological attitudes and knowledge. *American Psychologist*, 28(7), 583–586. doi: 10.1037/h0034936
- Maloney, M. P., Ward, M. P., & Braucht, G. N. (1975). A revised scale for the measurement of ecological attitudes and knowledge. *American Psychologist*, 30(7), 787–790. doi: 10.1037/h0084394
- Notter, D. A., Meyer, R., & Althaus, H.-J. (2013). The western lifestyle and its long way to sustainability. *Environmental Science & Technology*, 47(9), 4014–4021. doi: 10.1021/es3037548
- Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1978). Umweltgutachten 1978. Stuttgart/Mainz: Verlag W. Kohlhammer.
- Schahn, J., Damian, M., Schurig, U., & Fuchsle, C. (1999). Konstruktion und Evaluation der dritten Version des Skalensystems zur Erfassung des Umweltbewusstseins (SEU-3). Heidelberg: Psychologisches Institut der Universität Heidelberg.
- Stern, P. C. (2000). Toward a coherent theory of environmentally significant behavior. *Journal of Social Issues*, 56(3), 407–424. doi: 10.1111/0022-4537.00175

4. Ökosysteme

Was leistet die Umwelt für den Menschen?

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, Hochwasserschutz und Kohlenstoffspeicherung oder die Möglichkeit zur Naherholung (siehe United Nations et al. 2021, S. 131 für eine umfangreiche Referenzliste von Ökosystemleistungen). 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.

Die Ökosystemrechnungen füllen diese Lücke und geben den Leistungen der Natur durch ihre Quantifizierung einen Stellenwert. Damit können die Ergebnisse der Ökosystemgesamtrechnungen in die politische und wirtschaftliche Entscheidungsfindung eingebunden werden, die breite Öffentlichkeit ansprechen, sowie eine Grundlage für wissenschaftliche Analysen bieten.

Statistisches Rahmenwerk

Die Erfassung der Ökosystemleistungen ist ein weiterer neuer Teil der bereits etablierten Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR), welche die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Ökonomie, beispielsweise 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 beigefügt. Dieses anerkannte Rahmenwerk definiert nun die Struktur und die Accounting-Methoden des Berichtssystems (United Nations et al. 2021).

Zudem plant die EU über eine Veränderung der Verordnung (EU) Nr. 691/2011 die Einführung eines Berichtsmoduls für das Ecosystem Accounting, das weitgehend auf dem SEEA-EA beruht, die konkrete Implementierung für den europäischen Kontext definiert und die Ergebnisse vergleichbar macht (European Commission 2022).

Aufbau und Struktur

Die Ökosystemrechnungen sind in Konten aufgebaut, die Ausmaß (Extent), Zustand (Condition) und Leistungen (Services; physisch und monetär) in Bilanzform darstellen. Das heißt, der Inhalt dieser Konten wird dreijährlich als Zeitreihe auf vergleichbaren Aggregationseinheiten (Bund, Länder, Gemeinden) mit Anfangs- und Endbestand sowie Veränderung berichtet. Ausmaß 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 vollständig 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 miteinbezogen und die statistischen Ergebnisse nicht nur als Tabellenkonten, sondern auch als Karten darstellbar (siehe Abbildung 5).

Am Statistischen Bundesamt werden die Ökosystemrechnungen derzeit neu aufgebaut. Dabei kann auf eine Vielzahl von Erfahrungen und Pilotprojekten sowie auf die Fachexpertise aus Forschung und anderen Behörden zurückgegriffen werden (siehe Country Fact Sheet des EU Projekts MAIA (MAIA 2022) für eine Übersicht). Die Flächenbilanz wurde erstmals für die Zeitschritte 2015 und 2018 erstellt und geht nun in eine Dauerproduktion über (Statistisches Bundesamt 2021a). Die Zustandsbilanz wird

erstmalig im ersten Halbjahr 2023 veröffentlicht, die Bilanzen ausgewählter Ökosystemleistungen sukzessive im Jahr 2024.

Beispiel Ökosystemleistung „Lokale Klimaregulierung“

Urbane Grünflächen stellen dem Menschen an heißen Tagen eine regulierende Kühlleistung bereit, die Wohlbefinden steigert und gesundheitliche Vorteile bringt. Die Quantifizierung dieser Leistung verdeutlicht, wie die Konten der Ökosystemrechnungen in Verbindung funktionieren.

Zunächst werden urbane Grünflächen aus der Flächenbilanz der Ökosysteme als Geo-Daten extrahiert, um die Analyseeinheit für die Leistungsberechnung zu definieren. Insgesamt enthält die Flächenbilanz Informationen zu 74 Ökosystemklassen (Statistisches Bundesamt 2021b), die bei der Erstellung der Flächenbilanz anhand von Satellitendaten, Liegenschaftskatastern und Biotopkartierungen identifiziert und durch einen Algorithmus klassifiziert werden (siehe Abbildung 5). Informationen zu den Methoden der Flächenbilanz und detaillierte Steckbriefe zu allen Ökosystemtypen finden sich im Methodenbericht der Flächenbilanz (Statistisches Bundesamt 2021a und 2021b).

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, Verdunstung (Transpiration, Evaporation, Interzeption) und das Vorhandensein von anderen Vegetationstypen (Gras, Büsche) relevant. Auch die Beschaffenheit der angrenzenden Flächen (Baudichte, Versiegelung) kann miteinbezogen werden.

Zur Leistungsberechnung wird auf den urbanen Grünflächen per räumlicher Regression die funktionale Abhängigkeit der Lufttemperatur von der Vegetation und anderen Einflussgrößen geschätzt. Durch das geschätzte Modell kann dann die Temperatur im hypothetischen Fall ohne das Vorhandensein von Vegetation 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).

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 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 inter-



Abb. 5: Karte der Ökosysteme basierend auf der Flächenbilanz der Ökosysteme (Destatis 2023)

nationalen und nationalen Institutionen qualitätsgeprüfte, nutzungsbereite und teils maßgeschneiderte Datenprodukte in noch höherem Maße bereitgestellt und deren Fortschreibung langfristig gewährleistet werden.

Der letzte Aspekt betrifft auch einen der großen funktionalen Vorteile des Kontensystems der Ökosystemrechnungen. Die einheitlichen räumlichen Analyseeinheiten und die klare Accounting-Struktur ermöglicht 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. 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 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.

Potenzielle Anwendungen

Die Ökosystemrechnungen sind die potenzielle Quelle einer Vielzahl von Datenprodukten, die dementsprechend auch vielschichtig 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 Nachhaltigkeitsstrategien 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 regionalen 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.

Literatur Ökosysteme

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> (zuletzt aufgerufen am 13.3.2023)

Mapping and Assessment for Integrated ecosystem Accounting (MAIA) (2022). Country Fact Sheet Germany. https://maiaportal.eu/storage/app/media/factsheets_2022/MAIA_DE_Factsheet_2022.pdf (zuletzt aufgerufen am 13.3.2023)

Statistisches Bundesamt (2021a): Ökosystemgesamtrechnungen: Methode der Flächenbilanzierung der Ökosysteme. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/oekosystemgesamtrechnungen/Publikationen/Downloads/methode-flaechenbilanzierung-oekosysteme-5852201189004.pdf?blob=publicationFile> (zuletzt aufgerufen am 13.3.2023)

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> (zuletzt aufgerufen am 13.3.2023)

United Nations (1992). Convention on Biological Diversity. <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf> (zuletzt aufgerufen am 13.3.2023)

United Nations et al. (2021). System of Environmental-Economic Accounting — Ecosystem Accounting (SEEA EA). White cover publication, pre-edited text subject to official editing. <https://seea.un.org/ecosystem-accounting> (zuletzt aufgerufen am 13.3.2023)

5. Klimawandel

Statistik im Bereich Klimawandel

Das Phänomen Klimawandel wirft viele Sachfragen auf, deren Beantwortung samt 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 Mittelwerten, wie jahres-/tageszeitlich und regional aufgeschlüsselten Mittelwerten von Temperatur, Niederschlag oder Wind, sind Änderungen an deren Variabilität und Kovariabilität (verteilt sich der Niederschlag gleichmäßig über einen Monat oder gibt es vermehrt oder längere Dürre- bzw. Regenperioden?) sowie Tendenzen der Häufigkeit und der Intensität extremer Wetterereignisse wie Starkregen, Sturm oder Hitzewellen wesentliche Sachfragen, deren Erkennung und Beschreibung wichtige Hinweise für notwendige Anpassungen sozial-ökonomischer Systeme liefert.

Über die reine Beschreibung der Phänomene hinaus stellt sich die 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 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. Zwecks Erhöhung der Datenbasis werden dabei gerne Daten verschiedener Orte kombiniert, was die 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 Grads an Heterogenität. Sogenannte Reanalysen führen Beobachtungssysteme und numerisch-physikalische Modelle nach einem Optimalitätsverfahren zusammen und homogenisieren so weitgehend meteorologisch - klimatologische Beobachtungen in Raum und Zeit.

IPCC Report

Angesichts der Komplexität dieser Fragestellungen veröffentlicht das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) seit seiner Gründung 1988 regelmäßig etwa alle fünf bis sechs Jahre umfangreiche Sachstandsberichte, die IPCC Reports. 2021/22 wurde die sechste Auflage vorgestellt (IPCC, 2021/22). Viele Experten arbeiten zusammen an drei großen Teil-Reports mit je etwa 2500 Seiten. Der Bericht durchläuft mehrere Review- und Qualitätssicherungs-Runden und enthält viele Referenzen. Auch die Grafiken sind geprüft und frei nutzbar. Man hat in diesem Rahmen auch versucht, eine einheitliche Fachsprache bzw. ein gemeinsames Vokabular bezüglich statistischer Fragestellungen zu entwickeln. Beispielsweise hat man für statistische Hypothesentests gewisse Richtlinien und eine gewisse Einheitlichkeit festgelegt. Der aktuelle Bericht enthält auch ein umfassendes „Summary for Policy Makers“, das für diese Stellungnahme zur Umweltstatistik zentral ist.

Die drei Teilreports (Working Group (WG) I, II und III) behandeln drei Themencluster:

- 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)
- Mögliche Wege zur Vermeidung bzw. Milderung anthropogener Klimaänderungen (WG III)

Alle drei Working Groups verwenden in unterschiedlichen Ausprägungen statistische Modelle und Verfahren. Diese umfangreichen, durch Peer-Review abgesicherten Erkenntnisse der IPCC-Sachstandsberichte und die sich daraus ergebenden Forderungen zur Umsetzung sollten auch für Fragen des Klimawandels berücksichtigt und behandelt werden. Weiterführende statistische Modellierungen und Methoden sollten über transdisziplinäre Veröffentlichungen in zukünftige Sachstandsberichte einfließen.

Physikalisch-chemische Aspekte

So geht es in der ersten Working Group vor allem um folgende Fragestellungen: Können auf Basis der vorliegenden Beobachtungen 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 weiterer Klimasimulationen, bei denen die jeweiligen externen Antriebsfaktoren einzeln oder in Kombinationen vorgeschrieben werden.

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 raum-zeitlich korrelierten Residuums (Hasselmann 1979; Hasselmann 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). 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 Computermodelle 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.

Dieser gesamtheitliche Blick wird auch als Erdsystemwissenschaft verstanden und im „Zukunftsreport Wissenschaft“ 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 zum Tragen (Hannart et al. 2016; Pearl 2000).

Auswirkungen auf sozio-ökonomische Systeme

In der zweiten Working Group 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 IPCC-Sachstandsberichts nicht gerecht würde.

Vermeidung anthropogener Klimaänderungen

In der dritten Working Group geht es um das Thema Minderung und Vermeidung. 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 1,5K-/ 2K-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.

Eine wichtige Rolle bei der Untersuchung des Klimawandels kommt den sogenannten Reanalysen (Balmaseda et al. 2013; Hersbach et al. 2020) zu. Es handelt sich dabei um massiv große Level 4 Quasi-Daten (siehe auch Kapitel 6), 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 zeitlich befristet geförderten Forschungsverbünden wie ClimXtreme (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 in WG II und WG III verwendet werden können.

Literatur Klimawandel

Allen, M. R. & Stott, P. A. (2003). Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting, Part I: Theory. *Climate Dynamics* 21, 477-491. doi: 10.1007/s00382-003-0313-9

Balmaseda, M. A., Mogensen, K. & Weaver, A. T. (2013). Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 139(674), 1132-1161. doi: 10.1002/qj.2063

Barnett, T., Zwiers, F., Hegerl, G., Allen, M., Crowley, T., Gillett, N. ..., & Tett, S. (The International AD HOC Detection and Attribution Group) (2005). Detecting and attributing external influences on the climate system. *J. Climate* 18, 1291-1314. doi: 10.1175/JCLI3329.1

Chen, D., Rojas, M., Samset, B. H., Cobb, K., Diongue Niang, A., Edwards, P., ..., & Tréguier, A. M. (2021). Framing, context, and methods. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147–286, doi:10.1017/9781009157896.003

ClimXtreme (2020). ClimXtreme. Ein Forschungsnetzwerk zu Klimaextremen und Klimaänderungen. URL: <https://www.climxtreme.net/index.php/en/home-de> (zuletzt aufgerufen am 10.3.2023)

Gillett, N. P., Weaver, A. J., Zwiers, F. W. & Flannigan, M. D. (2004). Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical Research Letters* 31(18), doi: 10.1029/2004gl020876

Hannart, A. & Naveau, P. (2014). Estimating high dimensional covariance matrices: A new look at the Gaussian conjugate framework. *Journal of Multivariate Analysis* 131, 149-162. doi: 10.1016/j.jmva.2014.06.001

Hannart, A., Pearl, J., Otto, F. E. L., Naveau, P. & Ghil, M. (2016). Causal counterfactual theory for the attribution of weather and climate-related events. *B. Am. Meteorol. Soc.* 97, 99–110. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00034.1

Hasselmann, K. (1979). Linear statistical models. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 3, 501-521. doi: 10.1016/0377-0265(79)90029-0

Hasselmann, K. (1993). Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *Journal of Climate* 6(10), 1957-1971. doi: 10.1175/1520-0442(1993)006

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ..., & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021/22). Sixth Assessment Report. URL: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (zuletzt aufgerufen am 10.3.2023)

Meinshausen, M., Zebedee, R. J., Nicholls, J. L., Matthew J. Gidden, Vogel, E., ..., & Wang, R. H.-J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.*, 13(8), 3571–3605, doi:10.5194/gmd-13-3571-2020

Min, S. K., Hense, A., Paeth, H. & Kwon, W. T. (2004). A Bayesian decision method for climate change signal analysis. *Meteorologische Zeitschrift* 13(5), 421-436. doi: 10.1127/0941-2948/2004/0013-0421

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2022). Zukunftsreport Wissenschaft. Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel. Halle (Saale).

Oncken, O., von Blanckenburg, F., Wörner, G. & Schlosser, P. (2022). Erdsystemwissenschaft–Forschung für eine Erde im Wandel / Earth System Science Discovery, Diagnosis, and Solutions in Times of Global Change.

Pearl, J. (2000). *Causality: Models, Reasoning and Inference*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 384pp.

Shrestha, B. B., Perera, E.D.P., Kudo, S., Miyamoto, M., Yamazaki Y., Kuribayashi, D., ..., & Tokunaga, Y. (2019). Assessing flood disaster impacts in agriculture under climate change in the river basins of Southeast Asia. *Natural Hazards* 97 (1), 157-192, doi:10.1007/s11069-019-03632-1

Skeie, R. B., Peters, G.P., Fuglestad, J. & Andrew, R. (2021). A future perspective of historical contributions to climate change. *Clim. Change* 164(1), 24, doi:10.1007/s10584-021-02982-9

Smith, C. J., Forster, P. M., Allen, M., Leach, N., Millar, R. J., Passerello, G. A. & Regayre, L. A. (2018). FAIR v1.3: A simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. *Geosci. Model Dev.* 11(6), 2273–2297, doi:10.5194/gmd-11-2273-2018

Stone, D., Auffhammer, M., Carey, M., Hansen, G., Huggel, C., Cramer, W., ..., & Yohe, G., (2013). The challenge to detect and attribute effects of climate change on human and natural systems. *Climatic Change* 121(2), 381-395. doi: 10.1007/s10584-013-0873-6

Stott, P. A., Christidis, N., Otto, F. E. L., Sun, Y., Vanderlinden, J.-P., van Oldenborgh, G. J., ..., & Zwiers, F. W. (2016). Attribution of extreme weather and climate-related events. *WIREs Climate Change* 7(1), 23-41. doi: 10.1002/wcc.380

6. Daten

Grundlagen

Jegliche statistische Darstellung, sei es das direkte Abbilden von erfassten oder erhobenen 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 das Thema „Umweltstatistik“ ist, 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 leichter interpretierbare, statistisch unterlegte Informationen einen Nutzen bringen.

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; United Nations et al.

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 georeferenzierten 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 um 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).

Datenzugang

Zur effizienten Analyse der komplexen Zusammenhänge in der Umweltstatistik ist 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 Ökosystemgesamtrechnungen 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. Auf europäischer Ebene werden entsprechende Forderungen in dem jüngst veröffentlichten Jahresbericht des Governance Advisory Board der Europäischen Statistik aufgestellt (ESGAB 2022).

Datenübersichtstabelle

Die wichtigsten Datenquellen für diese Stellungnahme sind in einer Datenübersichtstabelle zusammengefasst, die unter

<https://www.dagstat.de/fileadmin/dagstat/documents/Datenuuebersicht-20230306.xlsx>

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

Literatur Daten

United Nations et al. (2014). System of Environmental-Economic Accounting 2012— Central Framework

United Nations et al. (2021). System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting (SEEA EA)

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>

7. 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 (vergleiche Abbildung 1). 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 Disziplinen 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 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 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. Das geplante Forschungsdatengesetz sollte diesen Bedarf ebenso berücksichtigen wie das künftige deutsche Dateninstitut.

8. Die 10 wichtigsten Methoden

In den bisherigen Kapiteln wurden Erkenntnisse aus unterschiedlichen Fachgebieten der Umweltstatistik vorgestellt, die nicht selten mit ähnlichen Methoden gewonnen wurden. Um Ihnen einen Blick in den Werkzeugkoffer der Umweltstatistik zu geben, bietet dieses Kapitel einen kompakten Überblick über zentrale Methoden und ihre Anwendungsfelder. Die folgende Zusammenstellung soll zudem Anknüpfungspunkte für verwandte Fachgebiete und die Politik bieten, um einen breiteren Einsatz in geeigneten Zusammenhängen zu fördern. Gleichwohl sei angemerkt, dass jede Methode spezifische Unsicherheiten und Anforderungen für die fachliche Begleitung mit sich bringt.

1. Regressionsmodelle

Regressionsmodelle ermöglichen die Untersuchung des Zusammenhangs einer abhängigen (z. B. Krankenhauseinweisungen, Mortalität) und einer oder mehrerer unabhängiger Variablen (z. B. Umweltrisikofaktoren). Sie werden aber auch zur Vorhersage von Umweltfaktoren verwendet, wie z. B. die räumliche Modellierung von Luftschadstoffen oder Temperatur. Neben der einfachen linearen Regression und dem Adjustieren für potentielle Störgrößen (z. B. Alter, Geschlecht) können in komplexeren additiven oder gemischten Modellen auch nichtlineare Zusammenhänge, Wechselwirkungen und wiederholte Messungen berücksichtigt werden.

[Anwendungsfelder: Umweltepidemiologie, Ökosysteme, Klimawandel]

2. Meta-analytische Methoden

Häufig ist eine einzelne Studie nicht groß und aussagekräftig genug, um eine Forschungsfrage zuverlässig beantworten zu können. Oder es gibt bereits mehrere Studien zu dieser Forschungsfrage, die aber zu widersprüchlichen Ergebnissen kommen. Um eine verlässliche Antwort zu finden, ist es deshalb nötig, möglichst mehrere bzw. alle Studien gemeinsam zu betrachten und zu analysieren. Mit meta-analytischen Methoden kann ein zusammengefasstes Ergebnis berechnet werden, das die Interpretation von Zusammenhängen und Auswirkungen erleichtert. Das Gesamtergebnis hat oft eine deutlich höhere Aussagekraft als die Ergebnisse der Einzelstudien. Allerdings kann es durch den sogenannten Publikationsbias (Studien mit positiven bzw. signifikanten Ergebnissen haben eine größere Chance, publiziert zu werden) zu einer verzerrten Datenlage in den wissenschaftlichen Zeitschriften kommen, die dann auch das zusammengefasste Ergebnis verzerren.

[Anwendungsfeld: Umweltepidemiologie]

3. Health Impact Assessment

Ein quantitatives Health Impact Assessment ist ein methodischer Rahmen, um die gesundheitlichen Auswirkungen von Schadstoffbelastungen und Emissions-Reduktions-Maßnahmen zu beurteilen. Hierfür werden Expositions-Wirkungs-Funktionen aus systematischen Übersichtsarbeiten herangezogen. Die Exposition der betroffenen Bevölkerung und die Größe der betroffenen Bevölkerung werden ebenfalls berücksichtigt. Die Luftqualität wird u.a. anhand von Monitoring-Daten geschätzt und die Umweltstatistik spielt eine wichtige Rolle.

[Anwendungsfeld: Umweltepidemiologie]

4. Environmental-Economic Accounting Standards

Die Umweltökonomischen Gesamtrechnungen sind ein methodischer Rahmen, um die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Gesellschaft abzubilden. Sie sind eine Zusammenstellung von standardisierten Konzepten, Definitionen, Klassifikationen und Accounting-Regeln, um konsistente und international vergleichbare Statistiken zu erzeugen. Daten zu Material- und Energieflüssen, Naturkapital und Umweltschutz werden in einem kohärenten Kontensystem aufbereitet, das die Betrachtung einzelner Merkmale in einem erweiterten Kontext ermöglicht.

[Anwendungsfeld: Ökosysteme]

5. Automatisierte Verarbeitung von Geo-Daten

Um Umweltdaten flächendeckend und regelmäßig erfassen zu können, kann auf Datenprodukte der Fernerkundung (wie jene des europäischen Copernicus-Programms), in-situ Monitoringdaten und

georeferenzierte Stichproben zurückgegriffen werden. Diese Geodaten können in räumlich konsistenten Analyseeinheiten kombiniert, durch Algorithmen klassifiziert und analysiert werden. Die Ökosystemrechnungen, die gänzlich auf flächendeckenden, räumlich hochaufgelösten Geodaten basieren, sind ein Anwendungsbeispiel dafür.

[Anwendungsfelder: Umweltepidemiologie, Ökosysteme, Klimawandel]

6. Modellierung von Ökosystemleistungen

Ökosystemleistungen, die von der Natur für den Menschen bereitgestellt werden, können durch verschiedene Methoden analysiert und quantifiziert werden. Dazu zählen unter anderem physikalische Modelle (z. B. der Hydrographie), Schätzmodelle (z. B. urbane Kühlleistung) oder räumliche Disaggregation (z. B. Tourismus oder Agrarstatistiken „in die Fläche bringen“).

[Anwendungsfeld: Ökosysteme]

7. Survey-Methoden

Surveys bzw. Umfragen dienen der Erhebung von personen- und haushaltsbezogenen Daten, z. B. Umwelteinstellungen und Umwelthandeln. In der Regel wird eine Zufallsstichprobe aus einer großen Grundgesamtheit (z. B. aller in Deutschland in Privathaushalten lebenden Personen ab 18 Jahren) gezogen, die dann mittels standardisiertem Fragebogen befragt wird. Zur Umfrageadministration stehen unterschiedliche Erhebungsmodi sowie deren systematische Kombination im Rahmen von Mixed-Mode-Surveys zur Verfügung: persönlich (face-to-face), telefonisch, postalisch und online. Bei entsprechender Planung können Umfragedaten auch mit anderen Datenquellen verknüpft werden, z. B. mit Geo-Informationen über das Wohngebiet der Befragten durch Geo-Referenzierung (siehe Methode 5) zur Analyse umweltepidemiologischer Fragestellungen (siehe Methode 1).

[Anwendungsfeld: Umweltepidemiologie, Umwelthandeln]

8. Flussrechnungsmodelle

Flussrechnungen haben sowohl auf der Seite der Natur (Wasser, Energie usw.) als auch auf der Seite der Wirtschaft (Input/Output von Wirtschaftssektoren) eine lange Tradition in der sachlogischen Verbindung von Einzeldaten (siehe Abbildung 6). Ihr besonderer „Charme“ für die Umweltstatistik zeigt sich dann, wenn es um die Quantifizierung von physischen Flüssen (Energie, Materialien) aus der Natur in die Wirtschaft hinein, durch diese hindurch und wieder hinaus geht, und zwar mit den entsprechenden Begleiterscheinungen in Form von Abfallproduktion, Energieverbrauch oder toxischen Belastungen für Natur und Mensch.

[Anwendungsfeld: Klimawandel]

9. Indikatoren und Kommunikation von Material- und Energieflüssen

Mit Hilfe von Flussrechnungen lassen sich hochaggregierte Indikatoren, wie Carbon Footprint, Domestic Material Consumption („Fußabdruck“ des Konsums gemessen in Rohstoffen) oder die Ressourcenproduktivität berechnen. Solche Indikatoren sind geeignet, die bisher populären Indikatoren wie Bruttoinlandsprodukt oder Arbeitsproduktivität in Dashboards der Politik sinnvoll zu ergänzen.

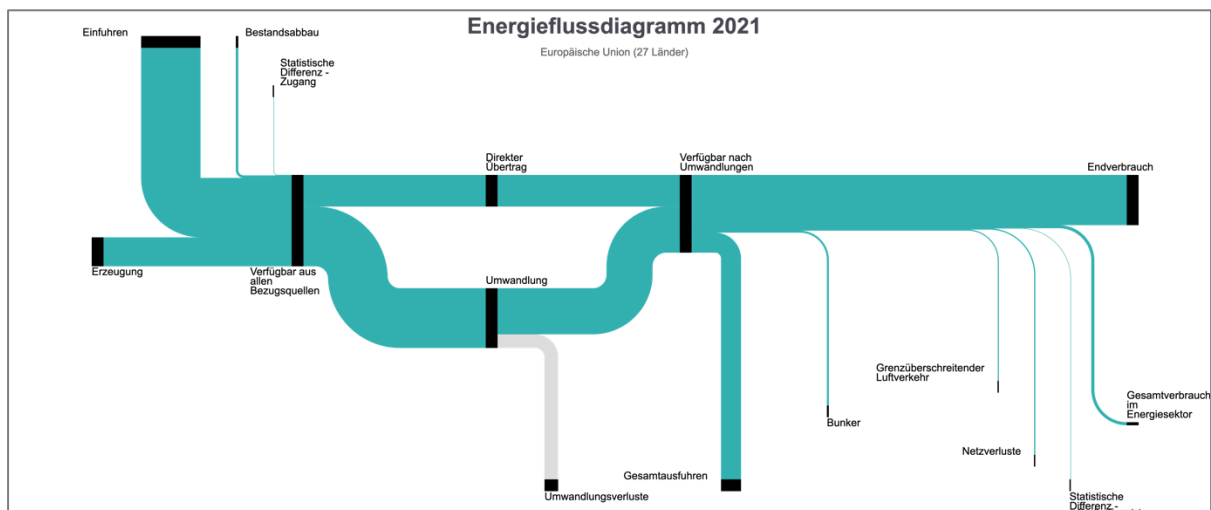


Abb. 6: Energieflussdiagramm 2021, Europäische Union (Quelle: Eurostat, Energy balances flow for EU27)

Darüber hinaus ermöglichen Flussrechnungen auch wichtige Analysen auf geographisch feineren Gliederungsebenen (z. B. Hydrographie) oder Wirtschaftssektoren. Auf empirischen Flussrechnungen können Modelle zukünftiger Entwicklungen oder politische Szenarien aufbauen.

[Anwendungsfeld: Klimawandel]

10. Extremwertstatistik

Für die Warnung vor meteorologischen Extremen oder die Planung, z. B. von Schutzvorrichtungen und baulichen Maßnahmen allgemein, sind wir auf die Abschätzung der maximalen Intensität und auch der Häufigkeit von Extremereignissen (Starkregen, Orkanstärken, Hitzeperioden etc.) angewiesen, mit denen wir in den kommenden Stunden bis Tagen oder Jahren rechnen müssen – oder über noch deutlich längere Zeiträume. Die Extremwertstatistik erlaubt es, Aussagen hierüber samt der zugehörigen statistischen Unsicherheit mittels statistischer Modelle und Grenzwertsätze für Maxima aus oft vergleichsweise kurzen Datenreihen abzuleiten. Die moderne Forschung in diesem Bereich befasst sich dabei unter anderem mit der Berücksichtigung von Unsicherheiten über das angenommene Modell, die räumliche Struktur von Extremereignissen aufgrund der beteiligten physikalischen Prozesse und von Trends aufgrund von klimatischen Änderungen.

[Anwendungsfeld: Klimawandel]

Autorenliste (Gesamtdokument)

Susanne Breitner-Busch	Helmholtz Zentrum München	
Andreas Diekmann	ETH Zürich (em.) & Universität Leipzig	
Christina Elmer	Technische Universität Dortmund	Netzwerk Recherche e. V.
Roland Fried	Technische Universität Dortmund	DStatG
Sarah Friedrich	Universität Augsburg	DAGStat
Andreas Groll	Technische Universität Dortmund	
Andreas Hense	Universität Bonn	
Claudia Hornberg	Universität Bielefeld	Vorsitzende Sachverständigenrat für Umweltfragen
Katja Ickstadt	Technische Universität Dortmund	Vorsitzende DAGStat
Helmut Küchenhoff	Ludwig-Maximilians-Universität München	DAGStat
Heinz Leitgöb	Universität Leipzig & Universität Frankfurt	Sektion Methoden der empirischen Sozialforschung der DGS
Friederike Paetz	Technische Universität Clausthal	Gesellschaft für Klassifikation e. V.
Walter J. Radermacher	Ludwig-Maximilians-Universität München	FENStatS
Kathrin Wolf	Helmholtz Zentrum München	

Autorenliste (Ausgewählte Kapitel)

2. Umweltepidemiologie

André Conrad	Umweltbundesamt	DGEpi (AG Statistische Methoden in der Epidemiologie)
Kateryna Fuks	Hochschule Magdeburg-Stendal	gmDs, DGEpi (AG Statistische Methoden in der Epidemiologie)
Barbara Hoffmann	Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf	gmDs, DGEpi (AG Statistische Methoden in der Epidemiologie)

4. Ökosysteme

Simon Felgendreher	Destatis	Destatis
Simon Schürz	Destatis	Destatis