

LUKE KEMP lehrt Umweltpolitik an der Australian National University und war Leitautor des „Climate Endgame“-Papers, das er in seiner Zeit als Research Associate am Centre for the Study of Existential Risk (University of Cambridge, UK) gemeinsam mit folgenden Kolleg*innen veröffentlichte:

CHI XU, School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

JOANNA DEPLEDGE, Cambridge Centre for Environment, Energy and Natural Resource Governance, University of Cambridge, UK;

KRISTIE L. EBI, Center for Health and the Global Environment, University of Washington, USA;

GOODWIN GIBBINS, Future of Humanity Institute, University of Oxford, UK;

TIMOTHY A. KOHLER, Department of Anthropology, Washington State University, USA;

JOHAN ROCKSTRÖM, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Deutschland;

MARTEN SCHEFFER, Department of Environmental Sciences, University of Wageningen, Niederlande;

HANS JOACHIM SCHELLNHUBER, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Deutschland;

WILL STEFFEN, Fenner School of Environment and Society, The Australian National University, Australien;

TIMOTHY M. LENTON, Global Systems Institute, University of Exeter, UK.

Zuerst erschienen als „Climate Endgame: Exploring Catastrophic Climate Change Scenarios“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 119, 34 (2022), e2108146119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2108146119>. ©

Übersetzung aus dem Englischen: Thomas Köhler, Marian Bichler

ARTIKEL VON LUKE KEMP, CHI XU, JOANNA DEPLEDGE, KRISTIE L. EBI, GOODWIN GIBBINS, TIMOTHY A. KOHLER, JOHAN ROCKSTRÖM, MARTEN SCHEFFER, HANS JOACHIM SCHELLNHUBER, WILL STEFFEN UND TIMOTHY M. LENTON

Climate Endgame

Erkundung von Szenarien eines katastrophalen Klimawandels

Ein umsichtiges Risikomanagement erfordert die Berücksichtigung von Bad-to-Worst-Case-Szenarien. Im Falle des Klimawandels sind solche möglichen Zukünfte bisher noch unzureichend verstanden. Könnte der vom Menschen verursachte Klimawandel zu einem weltweiten Zusammenbruch der Gesellschaft oder sogar zum Aussterben der Menschheit führen? Gegenwärtig ist dieses Thema in gefährlicher Weise zu wenig erforscht. Dabei gibt es genügend Gründe für die Vermutung, dass der Klimawandel zu einer globalen Katastrophe führen könnte. Die Analyse der Mechanismen, die zu diesen extremen Folgen führen können, könnte dazu beitragen, wachzurütteln, Resilienz zu erhöhen und Entscheidungsgrundlagen für politisches Handeln bereitzustellen – Notfallmaßnahmen eingeschlossen. Wir skizzieren den aktuellen Wissensstand über die Wahrscheinlichkeit extremer Klimaveränderungen, erörtern, warum das Verständnis der Bad-to-Worst-Szenarien überlebenswichtig ist, formulieren Gründe für die Besorgnis über katastrophale Folgen, definieren Schlüsselbegriffe und legen eine Forschungsagenda vor. Die vorgeschlagene Agenda umfasst vier Hauptfragen: 1) Wie groß ist das Potenzial des Klimawandels, Massenaussterbeereignisse auszulösen? 2) Welches sind die Ursachen

Beiträge der Autor*innen: L.K. konzipierte die Forschung; L.K., C.X., J.D., K.L.E., G.G., T.A.K., J.R., M.S., H.J.S., W.S., und T.M.L. führten die Forschung durch; L.K., C.X., J.D., K.L.E., T.A.K., J.R., M.S., H.J.S., W.S. und T.M.L. analysierten die Daten; und L.K., C.X., J.D., K.L.E., G.G., T.A.K., J.R., M.S., H.J.S., W.S. und T.M.L. verfassten das Papier. Die Autor*innen erklären, dass sie keine konkurrierenden Interessen haben. Dieser Artikel ist eine PNAS-Direkteinreichung. Copyright © 2022 der Autor*innen. Veröffentlicht von PNAS. Dieser frei zugängliche Artikel wird unter der Creative Commons Attribution License 4.0 (CC BY) veröffentlicht. Der Schriftverkehr ist an folgende E-Mail-Adresse zu richten: ltk27@cam.ac.uk. Dieser Artikel enthält ergänzende Informationen online unter <https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2108146119>. I.O. veröffentlicht am 1. August 2022.

und Auslöser, die zu menschlicher Massensterblichkeit und -morbidity führen könnten? 3) Was sind die Vulnerabilitäten (Verwundbarkeiten) menschlicher Gesellschaften in klimabedingten Risikokaskaden, etwa durch Konflikte, politische Instabilität und systemische Finanzrisiken? 4) Wie können diese multiplen Erkenntnisstränge – in der Gesamtsicht mit anderen globalen Gefahren – sinnvoll zu einer „integrierten Katastrophenbewertung“ zusammengeführt werden? Es ist an der Zeit, dass sich die Scientific Community mit der Herausforderung auseinandersetzt, den katastrophalen Klimawandel besser zu verstehen.

Wie schlimm könnte der Klimawandel werden? Bereits 1988 benannte die bahnbrechende Erklärung der Konferenz von Toronto die vernichtenden Konsequenzen des Klimawandels als potenziell „nur noch von einem globalen Atomkrieg zu übertreffen“. Trotz solch jahrzehntealter Proklamationen ist die Klimakatastrophe relativ wenig erforscht und schlecht verstanden.

Das Potenzial für katastrophale Auswirkungen hängt vom Ausmaß und der Geschwindigkeit des Klimawandels ab, von den Schäden, die den Systemen der Erde und des Menschen zugefügt werden, sowie von der Vulnerabilität und Reaktion der betroffenen Systeme. Die Extreme in diesen Bereichen, also etwa starker Temperaturanstieg und kaskadenartige Auswirkungen, sind zu wenig untersucht worden. Wie der ‚Weltklimarat‘ IPCC feststellt, gibt es nur wenige quantitative Schätzungen der globalen Gesamtauswirkungen einer Erwärmung von 3 °C oder mehr. ① Eine Textanalyse der IPCC-Berichte ergab ebenfalls, dass Temperaturanstiege von 3 °C oder mehr im Verhältnis zu ihrer Wahrscheinlichkeit in Publikationen unterrepräsentiert sind. ② Die Text-Mining-Analyse deutet auch darauf hin, dass sich im Lauf der Zeit der in den IPCC-Berichten betrachtete Temperaturanstieg in Richtung 2 °C und darunter verschoben hat. ③ Die Forschung hat sich auf die Auswirkungen von 1,5 °C und 2 °C konzentriert, und Studien darüber, wie Klimaauswirkungen kaskadenartig auftreten oder größere Krisen auslösen könnten, sind spärlich.

Eine gründliche Risikobewertung müsste berücksichtigen, wie sich Risiken ausbreiten, interagieren, verstärken und durch menschliche Reaktionen verschlimmert werden, ④ aber selbst einfachere „Compound Hazard“-Analysen ⑤ von interagierenden Klimagefahren und -treibern werden zu wenig genutzt. Doch entwickeln sich die Risiken in der realen Welt in dieser Weise: Beispielsweise zerstört ein Wirbelsturm

① IPCC (2014): *Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, hrsg. von C. B. FIELD ET AL., New York, NY: Cambridge University Press 2014.

② JEHN, F.U./SCHNEIDER, M./WANG, J.R./KEMP, L./BREUER, L. (2021): „Betting on the Best Case: Higher End Warming Is Underrepresented in Research“, in: *Environmental Research Letters* 16, 084036. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac13ef>.

③ JEHN, F.U./KEMP, L./ILIN, E./FUNK, C./WANG, J.R./BREUER, L. (2022): „Focus of the IPCC Assessment Reports Has Shifted to Lower Temperatures“, in: *Earth's Future* 10, 5. <https://doi.org/10.1029/2022EF002876>.

④ SIMPSON, N.P. ET AL. (2021): „A Framework for Complex Climate Change Risk Assessment“, in: *One Earth* 4, 4, S. 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005>.

⑤ Analyse zusammenhängender Faktoren und Risiken, a.d.Ü.

die elektrische Infrastruktur und macht die Bevölkerung anfällig für eine darauffolgende tödliche Hitzewelle. ⑥ In jüngster Zeit haben wir gesehen, dass sich Gefahrenverbünde durch den Klimawandel und die COVID-19-Pandemie verstärken. ⑦ Wie der IPCC feststellt, werden die Klimarisiken immer komplexer und schwieriger zu handhaben und wirken sich kaskadenartig auf alle Regionen und Sektoren aus. ⑧

Warum die Konzentration auf eine geringere Erwärmung und einfache Risikoanalysen? Ein Grund ist der Maßstab für die internationalen Ziele: das Ziel des Pariser Abkommens, die Erwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, wobei 1,5 °C angestrebt wird. Ein weiterer Grund ist die Kultur der Klimawissenschaft, „möglichst wenig Drama zu produzieren“ ⑨ und keine Panikmache zu betreiben, was durch die Konsensprozesse des IPCC noch verstärkt werden kann. ⑩ Komplexe Risikobewertungen sind zwar realistischer, aber auch schwieriger zu erstellen.

Diese Zurückhaltung ist verständlich, steht aber in keinem Verhältnis zu den Risiken und potenziellen Schäden, die der Klimawandel mit sich bringt. Wir wissen, dass der Temperaturanstieg „Fat Tails“ besitzt: Extremereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit und großen Auswirkungen. ⑪ Klimaschäden sind voraussichtlich nichtlinear und führen statistisch gesehen zu noch größeren Anomalien. ⑫ Es steht zu viel auf dem Spiel, als dass man auf die Untersuchung von Szenarien mit hoher Auswirkung und geringer Wahrscheinlichkeit verzichten könnte. Die COVID-19-Pandemie hat deutlich gemacht, wie wichtig es ist, sich mit selten auftretenden, schwerwiegenden globalen Risiken und den systemischen Gefahren, die sie auslösen können, auseinanderzusetzen und sich darauf vorzubereiten. Ein umsichtiges Risikomanagement erfordert eine gründliche Bewertung von Worst-Case-Szenarien.

Die von uns vorgeschlagene Climate-Endgame-Forschungsagenda zielt auf die Erforschung der schlimmsten mit dem anthropogenen Klimawandel verbundenen Risiken. Zur Einführung fassen wir die vorhandenen Erkenntnisse über die Wahrscheinlichkeit eines extremen Klimawandels zusammen, erläutern, warum die Erforschung katastrophaler Ernstfallszenarien von entscheidender Bedeutung ist, nennen Gründe zur Besorgnis über eine Katastrophe, definieren Schlüsselbegriffe und erklären dann die vier Hauptaspekte der Forschungsagenda.

⑥ MATTHEWS, T./WILBY, R.L./MURPHY, C. (2019): „An Emerging Tropical Cyclone–Deadly Heat Compound Hazard“, in: *Nature Climate Change* 9, S.602–606.

⑦ PHILLIPS, C.A. ET AL. (2020): „Compound Climate Risks in the COVID-19 Pandemic“, in: *Nature Climate Change* 10, S. 586–588.

⑧ IPCC (2022): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, hrsg. von H.-O. PÖRTNER ET AL., New York, NY: Cambridge University Press.

⑨ BRYSSSE, K./ORESQUES, N./O'REILLY, J./OPPENHEIMER, M. (2013): „Climate Change Prediction: Erring on the Side of Least Drama?“, in: *Global Environmental Change* 23, 1, S. 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.008>.

⑩ OPPENHEIMER, M. ET AL. (2019): *Discerning Experts: The Practices of Scientific Assessment for Environmental Policy*, Chicago, IL: University of Chicago Press.

⑪ WAGNER, G./WEITZMAN, M.L. (2015): *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet*, Princeton, NJ: Princeton University Press.

⑫ LYNAS, M. (2020): *Our Final Warning: Six Degrees of Climate Emergency*, New York, NY: Harper Collins; dt.: *6 Grad mehr: Die verheerenden Folgen der Erderwärmung*, Hamburg: Rowohlt.

Worst-Case-Klimawandel

Trotz 30-jähriger Bemühungen und einiger Fortschritte unter den Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) steigen die anthropogenen Treibhausgas-(THG-)Emissionen weiter an. Selbst wenn man die schlimmsten Klimakatastrophenszenarien außer Acht lässt, ist die Welt auf dem Pfad eines Temperaturanstiegs zwischen 2,1°C und 3,9°C bis zum Jahr 2100. ⁽¹³⁾ Sogar, wenn alle für 2030 festgelegten nationalen Maßnahmen vollständig umgesetzt werden, wird bis 2100 eine Erwärmung von 2,4°C (1,9°C bis 3,0°C) erwartet. Bei Einhaltung aller langfristigen Zusagen und Ziele könnte dies auf 2,1°C (1,7°C bis 2,6°C) reduziert werden. ⁽¹⁴⁾ Selbst diese optimistischen Annahmen führen zu gefährlichen Entwicklungen im Erdsystem. Temperaturen von mehr als 2°C über den vorindustriellen Werten wurden auf der Erdoberfläche seit dem Pleistozän (oder vor mehr als 2,6 Millionen Jahren) nicht mehr erreicht. ⁽¹⁵⁾

Selbst wenn die anthropogenen THG-Emissionen bald zurückgehen, schließt dies hohe zukünftige THG-Konzentrationen oder extreme Klimaveränderungen, insbesondere nach 2100, nicht aus. Es gibt Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf und potenzielle Kippunkte, die zu hohen THG-Konzentrationen führen könnten, ⁽¹⁶⁾ die in den Modellen oft nicht berücksichtigt werden. Beispiele dafür sind das Auftauen des arktischen Permafrosts, bei dem Methan und CO₂ freigesetzt werden, ⁽¹⁷⁾ der Kohlenstoffverlust durch intensive Dürren und Brände im Amazonasgebiet ⁽¹⁸⁾ und die offensichtliche Verlangsamung abdämpfender Rückkopplungen wie der natürlichen Kohlenstoffsensitiven Kapazität. ⁽¹⁹⁾ Diese sind wahrscheinlich nicht proportional zur Erwärmung, wie manchmal angenommen wird. Stattdessen könnten abrupte und/oder unumkehrbare Veränderungen bei einem Temperaturschwellenwert ausgelöst werden. Solche Veränderungen sind in den geologischen Aufzeichnungen der Erde nachweisbar, und ihre Auswirkungen wirken sich kaskadenartig auf die gekoppelten klima-ökologisch-sozialen Systeme aus. ⁽²⁰⁾ Besonders besorgniserregend ist eine „Kippkaskade“, bei der mehrere Kippelemente so zusammenwirken, dass das Kippen einer Schwelle die Wahrscheinlichkeit des Kippens einer anderen erhöht. ⁽²¹⁾ Der Temperaturanstieg hängt entscheidend von der Gesamtdynamik des Erdsystems ab, nicht nur von der Entwicklung der anthropogenen Emissionen. ⁽²²⁾

Es gibt sogar noch ungewissere Rückkopplungsprozesse, die sich im schlimmsten Fall zu einem irreversiblen Übergang in einen „Hothouse-Earth“-Zustand verstärken könnten ⁽²³⁾ (obwohl es negative Rückkopplungen geben kann, die

⁽¹³⁾ LIU, P.R./RAFTERY, A.E. (2021): „Country-Based Rate of Emissions Reductions Should Increase by 80 % Beyond Nationally Determined Contributions to Meet the 2 °C Target“, in: *Communications Earth & Environment* 2, 29. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00097-8>.

⁽¹⁴⁾ CLIMATE ACTION TRACKER (2022): „2100 Warming Projections“, in: *Climate Action Tracker*. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures>.

⁽¹⁵⁾ WILLEIT, M./GANOPOLSKI, A./CALOV, R./BROVKIN, V. (2019): „Mid-Pleistocene Transition in Glacial Cycles Explained by Declining CO₂ and Regolith Removal“, in: *Science Advances* 5, eaav7337. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7337>.

⁽¹⁶⁾ MASSON-DELMOTTE, V. ET AL. (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY: Cambridge University Press.

⁽¹⁷⁾ NATALI, S.M. ET AL. (2019): „Large Loss of CO₂ in Winter Observed Across the Northern Permafrost Region“, in: *Nature Climate Change* 9, S. 852–857. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0592-8>.

⁽¹⁸⁾ YANG, Y. ET AL. (2018): „Post-Drought Decline of the Amazon Carbon Sink“, in: *Nature Communications* 9, 3172. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05668-6>.

⁽¹⁹⁾ RAUPACH, M.R. ET AL. (2014): „The Declining Uptake Rate of Atmospheric CO₂ by Land and Ocean Sinks“, in: *Biogeosciences* 11, 13, S. 3453–3475. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3453-2014>. HUBAU, W. ET AL. (2020): „Asynchronous Carbon Sink Saturation in African and Amazonian Tropical Forests“, in: *Nature* 579, S. 80–87. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>.

das Erdsystem abpuffern). Insbesondere die schlecht verstandenen Wolken-Rückkopplungen könnten eine plötzliche und unumkehrbare globale Erwärmung auslösen. ⁽²⁴⁾ Solche Effekte bleiben unerforscht und weitgehend spekulative „unbekannte Unbekannte“, die erst noch entdeckt werden müssen. Jüngste Simulationen deuten beispielsweise darauf hin, dass Stratokumulus-Wolkendecken bei CO₂-Konzentrationen, die bis zum Ende des Jahrhunderts erreicht werden könnten, abrupt verloren gehen könnten, was eine zusätzliche globale Erwärmung von ~8°C verursachen würde. ⁽²⁵⁾ Große Unsicherheiten in Bezug auf gefährliche Überraschungen sind ein Grund, ihnen Priorität einzuräumen, anstatt sie zu vernachlässigen.

Jüngste Erkenntnisse über die Gleichgewichts-Klimasensitivität (Equilibrium Climate Sensitivity, ECS) ⁽²⁶⁾ unterstreichen, dass das Ausmaß des Klimawandels unsicher ist, selbst wenn wir die künftigen THG-Konzentrationen kennen. Dem IPCC zufolge liegt unsere beste Schätzung für die ECS bei einem Temperaturanstieg von 3°C pro CO₂-Verdoppelung, mit einer Wahrscheinlichkeitsspanne (66 bis 100% Wahrscheinlichkeit) von 2,5°C bis 4°C. Während ein ECS unter 1,5°C im Wesentlichen ausgeschlossen wurde, verbleibt eine 18-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass der ECS größer als 4,5°C sein könnte. ⁽²⁷⁾ Die Verteilung des ECS ist statistisch gesehen „Heavy Tailed“, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit für sehr hohe ECS-Werte als für sehr niedrige Werte.

Auch bei den künftigen anthropogenen THG-Emissionen bestehen erhebliche Unsicherheiten. Der repräsentative Konzentrationspfad 8.5 (RCP8.5, jetzt SSP5-8.5), der höchste in den IPCC-Szenarien verwendete Emissionspfad, entspricht am ehesten den bisherigen kumulativen Emissionen. ⁽²⁸⁾ Aufgrund der sinkenden Preise für erneuerbare Energien und der politischen Maßnahmen wird dies in Zukunft möglicherweise nicht mehr der Fall sein. ⁽²⁹⁾ Dennoch gibt es weiterhin Gründe zur Vorsicht. So bestehen beispielsweise erhebliche Unsicherheiten bei Schlüsselvariablen wie der Energienachfrage und dem Wirtschaftswachstum. Plausible höhere Wirtschaftswachstumsraten könnten den RCP8.5 um 35% wahrscheinlicher machen. ⁽³⁰⁾

Warum die Klimakatastrophe erforschen?

Warum müssen wir über die plausiblen Worst Cases Bescheid wissen? Erstens erfordern Risikomanagement und robuste Entscheidungsfindung unter Unsicherheit die Kenntnis von Extremen. So werden mit dem sogenannten Minimax-Kriterium

⁽²⁰⁾ BROVKIN, V. ET AL. (2021): „Past Abrupt Changes, Tipping Points and Cascading Impacts in the Earth System“, in: *Nature Geoscience* 14, S. 550–558. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00790-5>.

⁽²¹⁾ KLOSE, A.K./WUNDERLING, N./WINKELMANN, R./DONGES, J.F. (2021): „What Do We Mean, Tipping Cascade?“, in: *Environmental Research Letters* 16, 125011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3955>.

⁽²²⁾ SI-Anhang: <https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2108146119>.

⁽²³⁾ STEFFEN, W. ET AL. (2018): „Trajectories of the Earth System in the Anthropocene“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 115, 33, S. 8252–8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>.

⁽²⁴⁾ POPP, M., SCHMIDT/H., MARIOTZKE, J. (2016): „Transition to a Moist Greenhouse With CO₂ and Solar Forcing“, in: *Nature Communications* 7, 10627. <https://doi.org/10.1038/ncomms10627>.

⁽²⁵⁾ SCHNEIDER, T./KAUL, C.M./PRESSEL, K.G. (2019): „Possible Climate Transitions From Breakup of Stratocumulus Decks Under Greenhouse Warming“, in: *Nature Geoscience* 12, S. 163–167. <https://www.nature.com/articles/s41561-019-0310-1>.

⁽²⁶⁾ MASSON-DELMOTTE ET AL. (wie Anm. 16) sowie SHERWOOD, S.C. ET AL. (2020): „An Assessment of Earth's Climate Sensitivity Using Multiple Lines of Evidence“, in: *Reviews of Geophysics* 58, e2019RG000678. <https://doi.org/10.1029/2019RG000678>.

⁽²⁷⁾ MASSON-DELMOTTE ET AL. (2021) (wie Anm. 16).

politische Maßnahmen nach ihren ungünstigsten Resultaten bewertet. ³¹ Ein solcher Ansatz eignet sich besonders für Bereiche, die durch hohe Unsicherheiten und Restrisiken gekennzeichnet sind. Emissionspfade, künftige Konzentrationen, künftige Erwärmung und künftige Auswirkungen sind allesamt unsicher. Das heißt, wir können nicht objektiv Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Resultate vorgeben. ³² Klimaschäden fallen in den Bereich der „Deep Uncertainty“, der tiefgreifenden Unsicherheit: Wir kennen weder die Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Ergebnisse noch die genaue Kette von Ursache und Wirkung, die zu den Ergebnissen führen wird, noch die Bandbreite, den Zeitpunkt oder die Erwünschtheit bestimmter Ergebnisse. ³³ Unsicherheit, ob sie nun tiefgreifend ist oder nicht, sollte zu Vorsicht und Wachsamkeit motivieren, nicht zu Selbstberuhigung.

Katastrophale Auswirkungen, selbst wenn sie unwahrscheinlich sind, haben wichtige Folgen für Wirtschaftsanalyse, Modellierung und gesellschaftlichen Respons. ³⁴ So können beispielsweise eine extreme Erwärmung und die daraus resultierenden Schäden die prognostizierten sozialen Kosten des Kohlenstoffs erheblich erhöhen. ³⁵ Das Verständnis der Verwundbarkeit und der Reaktionen menschlicher Gesellschaften kann Informationen für die Politikgestaltung und die Entscheidungsfindung liefern, um Systemkrisen zu verhindern. Indizierte Schlüsselvariablen können Frühwarnsignale liefern. ³⁶

Die Kenntnis der Worst Cases kann zum Handeln zwingen, so wie die Vorstellung eines „nuklearen Winters“ 1983 die öffentliche Besorgnis und die Bemühungen um nukleare Abrüstung unterstützt hat. Die Erforschung schwerwiegender Risiken und Hoherhitzungsszenarien könnte ein erneutes Bekenntnis zur Leitplanke von 1,5 °C bis 2 °C als der „am wenigsten unattraktiven“ Option festigen. ³⁷

Das Verständnis von Klimakatastrophenszenarien kann auch als Grundlage für politische Interventionen dienen, einschließlich Notfallmaßnahmen wie Solar Radiation Management (SRM), das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre, um das Sonnenlicht zu reflektieren. ³⁸ Ob auf solche Maßnahmen zurückgegriffen werden soll, hängt von den Risikoprofilen der Szenarien für den Klimawandel und das SRM ab. Eine kürzlich durchgeführte Analyse des potenziellen Katastrophenrisikos der stratosphärischen Aerosolinjektion (SAI) ergab, dass die direkten und systemischen Auswirkungen kaum erforscht sind. ³⁹ Die größte Gefahr scheint von einem sogenannten „Termination Shock“ auszugehen: einer abrupten und schnellen Erwärmung, wenn das SAI-System

²⁸ SCHWALM, C.R./GLENDON, S./DUFFY, P.B. (2020): „RCP8.5 Tracks Cumulative CO₂ Emissions“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 117, 33, S.19656–19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>.

²⁹ HAUSFATHER, Z./PETERS, G.P. (2020): „Emissions – the ‚Business as Usual‘ Story Is Misleading“, in: *Nature* 577, 618–620.

³⁰ CHRISTENSEN, P./GILLINGHAM, K./NORDHAUS, W. (2018): „Uncertainty in Forecasts of Long-Run Economic Growth“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 115, 21, S. 5409–5414. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713628115>.

³¹ KUNREUTHER, H. ET AL. (2013): „Risk Management and Climate Change“, in: *Nature Climate Change*, 3, S. 447–450. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1740>.

³² KNIGHT, F.H. (1921): *Risk, Uncertainty and Profit*, Boston, MA/New York, NY: Houghton Mifflin.

³³ DITTRICH, R./WREFORD, A./MORAN, D. (2016): „A Survey of Decision-Making Approaches for Climate Change Adaptation: Are Robust Methods the Way Forward?“, in: *Ecological Economics* 122, S. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.12.006>.

³⁴ DIETZ, S. (2011): „High Impact, Low Probability? An Empirical Analysis of Risk in the Economics of Climate Change“, in: *Climatic Change* 108, S. 519–541. WEITZMAN, M.L. (2011): „Fat-Tailed Uncertainty in the Economics of Catastrophic Climate Change“, in: *Review of Environmental Economics and Policy*, 5, S. 275–292. <https://doi.org/10.1093/reep/rer006>.

³⁵ Siehe DIETZ (2011) (wie Anm. 34).

gestört wird. Die SAI verschiebt also die Risikoverteilung: Der statistische Medianwert zeigt hinsichtlich des abzufangenden Klimawandels eventuell das bessere Resultat, aber der dazugehörige „Tail“ – also das Rest-Risiko [eines gestörten SAI-Systems, Anm.d.Ü.] könnte Schlimmeres implizieren als die Erwärmung. ⁴⁰

Es gibt weitere Maßnahmen, die durch ein besseres Verständnis des katastrophalen Klimawandels angestoßen werden könnten. Auf internationaler Ebene besteht zum Beispiel die Chance auf einen „Tail-Risk-Vertrag“: ein Abkommen oder Protokoll, das stärkere Verpflichtungen und Mechanismen in Gang setzt, wenn Frühwarnindikatoren für potenzielle abrupte Veränderungen ausgelöst werden.

Die Möglichkeit einer Klimakatastrophe

Es gibt vier Hauptgründe zur Besorgnis über die Möglichkeit einer globalen Klimakatastrophe. Erstens gibt es Warnungen aus der Geschichte. Der (regionale oder globale) Klimawandel hat beim Zusammenbruch oder Wandel zahlreicher früherer Gesellschaften ⁴¹ und bei jedem der fünf Massenaussterben im Phanerozoikum eine Rolle gespielt. ⁴² Die derzeitige Kohlenstofffreisetzung vollzieht sich in einem geologisch beispiellosen Tempo und könnte bis zum Ende des Jahrhunderts die Schwellenwerte überschreiten, die frühere Massenaussterben auslösten. ⁴³ Die Worst-Case-Szenarien des IPCC-Berichts prognostizieren für das 22. Jahrhundert Temperaturen, wie sie zuletzt im frühen Eozän herrschten, und kehren damit 50 Millionen Jahre kühleren Klimas im Zeitraum von zwei Jahrhunderten um. ⁴⁴

Dies ist besonders alarmierend, da menschliche Gesellschaften lokal angepasst sind an eine spezifische klimatische Nische. Der Aufstieg großflächiger, urbanisierter Agrargesellschaften begann mit dem Übergang zum stabilen Klima des Holozäns vor ~12.000 Jahren. ⁴⁵ Seitdem erreichte die menschliche Bevölkerungsdichte ihren Höhepunkt innerhalb eines engen klimatischen Rahmens mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von ~13 °C. Auch heute noch sind die wirtschaftlich produktivsten Zentren menschlicher Aktivitäten in diesen Gebieten konzentriert. ⁴⁶ Die kumulativen Auswirkungen der Erwärmung könnten die gesellschaftlichen Anpassungsfähigkeiten überfordern.

Zweitens könnte der Klimawandel unmittelbar andere katastrophale Risiken wie internationale Konflikte auslösen oder die Ausbreitung von Infektionskrankheiten und Spillover-Risiken verschärfen. Dies könnten potente Multiplikatoren

³⁶ LENTON, T.M. (2011): „Early Warning of Climate Tipping Points“, in: *Nature Climate Change* 1, S. 201–209. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0304>.

³⁷ JORDAN, A. ET AL. (2013): „Going beyond Two Degrees? The Risks and Opportunities of Alternative Options“, in: *Climate Policy* 13, S. 751–769. <https://doi.org/10.1080/14693062.2013.835705>.

³⁸ FIELD, C. ET AL. (2021): *Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance*, Washington, DC: National Academies Press.

³⁹ TANG, A./KEMP, L. (2021): „A Fate Worse Than Warming? Stratospheric Aerosol Injection and Catastrophic Risk“, in: *Frontiers in Climate Science* 3, S. 1–17. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.720312>.

⁴⁰ Ebd.

⁴¹ KOHLER, T.A./ROCKMAN, M. (2020): „The IPCC: A Primer for Archaeologists“, in: *American Antiquity* 85, 4, S. 627–651. <https://doi.org/10.1017/aaq.2020.68>.

⁴² BRANNEN, P. (2017): *The Ends of the World: Volcanic Apocalypses, Lethal Oceans, and Our Quest to Understand Earth's Past Mass Extinctions*, New York, NY: Ecco.

⁴³ ROTHMAN, D.H. (2019): „Characteristic Disruptions of an Excitable Carbon Cycle“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 116, 30, S. 14813–14822. <https://doi.org/10.1073/pnas.1905164116>; DERS. (2017): „Thresholds of Catastrophe in the Earth System“, in: *Science Advances* 3, 9, e1700906. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700906>.

für extreme Herausforderungen sein.

Drittens könnte der Klimawandel die Verwundbarkeiten verschärfen und multiple indirekte Belastungen (wie etwa durch ökonomische Schäden, Landverluste, Wasser- und Ernährungsunsicherheit) verursachen, die sich zu systemweit synchronen Ausfällen zusammenfügen. Das ist der Pfad systemischer Risiken. Globale Krisen entstehen in der Regel durch solche sich verstärkenden „synchronen Ausfälle“, die sich über Länder und Systeme hinweg ausbreiten, wie bei der globalen Finanzkrise 2007–2008.⁴⁷ Es ist plausibel, dass die plötzliche klimatische Verschiebung Systemausfälle auslösen kann, die Gesellschaften auf der ganzen Welt aus dem Gleichgewicht bringen.

Das Potenzial des systemischen Klimarisikos ist vorgezeichnet: Die am stärksten gefährdeten Staaten und Gemeinschaften werden in einer sich erwärmenden Welt weiterhin am stärksten betroffen sein, was die Ungleichheiten noch verschärft. Abb. 1 zeigt, wie sich die prognostizierte Bevölkerungsdichte mit extremen Jahresmitteltemperaturen (Mean Annual Temperature, MAT) >29 °C überschneidet (derartige Temperaturen sind derzeit auf nur 0,8 % der Landoberfläche der Erde beschränkt). Bei Verwendung des mittelhohen Szenarios für Emissionen und Bevölkerungswachstum (SSP3-7.0-Emissionen und SSP3-Bevölkerungswachstum) werden bis 2070 voraussichtlich etwa 2 Milliarden Menschen in diesen extrem heißen Gebieten leben. Derzeit leben nur 30 Millionen Menschen in heißen Gebieten, vor allem in der Saharawüste und an der Golfküste.⁴⁸

Extreme Temperaturen in Verbindung mit hoher Luftfeuchtigkeit können sich negativ auf die Produktivität der im Freien Arbeitenden und die Erträge der wichtigsten Getreidearten auswirken. Diese tödlichen Hitzebedingungen könnten dicht bevölkerte Gebiete in Süd- und Südwestasien erheblich beeinträchtigen.⁴⁹

Abb. 2 betrachtet extreme Hitze aus einem politischen Blickwinkel, indem SSP3-7.0- oder SSP5-8.5-Projektionen von >29 °C MAT um 2070 mit dem „Fragile States“-Index (einem Maß für die Instabilität von Staaten) überlagert werden. Es gibt eine auffällige Überschneidung zwischen den derzeit gefährdeten Staaten und den künftigen Gebieten mit extremer Erwärmung. Wenn sich die derzeitige politische Fragilität in den kommenden Jahrzehnten nicht deutlich verbessert, könnte ein Gürtel der Instabilität mit potenziell schwerwiegenden Auswirkungen entstehen.

⁴⁴ BURKE, K.D. ET AL. (2018): „Pliocene and Eocene Provide Best Analogs for Near-Future Climates“. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 115, 52, S. 13288–13293. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809600115>.

⁴⁵ RICHERSON, P.J./BOYD, R./BETTINGER, R.L. (2001): „Was Agriculture Impossible During the Pleistocene but Mandatory During the Holocene? A Climate Change Hypothesis“, in: *American Antiquity* 66, 3, S. 387–411. <http://dx.doi.org/10.2307/2694241>.

⁴⁶ XU, C./KÖHLER, T.A./LENTON, T.M./SVENNING, J.-C./SCHEFFER, M. (2020): „Future of the Human Climate Niche“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 117, 21, S. 11350–11355. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910114117>.

⁴⁷ HOMER-DIXON, T., ET AL. (2015): „Synchronous Failure: The Emerging Causal Architecture of Global Crisis“, in: *Ecology and Society*, 20, 3, 6. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07681-200306>.

⁴⁸ XU ET AL. (wie Anm. 46).

⁴⁹ PAL, J.S./ELTAHIR, E.A.B. (2016): „Future Temperature in Southwest Asia Projected to Exceed a Threshold for Human Adaptability“, in: *Nature Climate Change*, 6, S. 197–200. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2833>.

⁵⁰ WORLDCLIM (2020): *WorldClim-Global Climate Data: Free Climate Data for Ecological Modeling and GIS*. <https://www.worldclim.com/node/1>.

⁵¹ INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS (2018): *SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 2.0*. <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>.

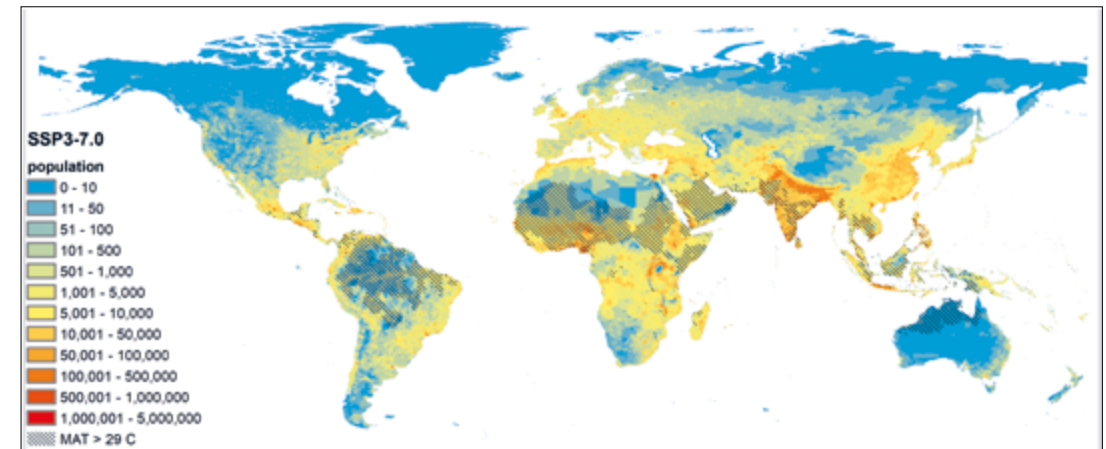


Abb. 1: Überschneidung zwischen zukünftiger Bevölkerungsverteilung und extremer Hitze. CMIP6-Modelldaten [aus neun GCM-Modellen, die in der WorldClim-Datenbank⁵⁰ verfügbar sind] wurden verwendet, um die MAT unter SSP3-7.0 um das Jahr 2070 (2060-2080) zusammen mit den gemeinsamen demografischen SSP3-Projektionen bis ~2070⁵¹ zu berechnen. Die schattierten Bereiche zeigen Regionen, in denen die MAT 29 °C überschreitet, während die farbige Topografie die Verteilung der Bevölkerungsdichte darstellt.

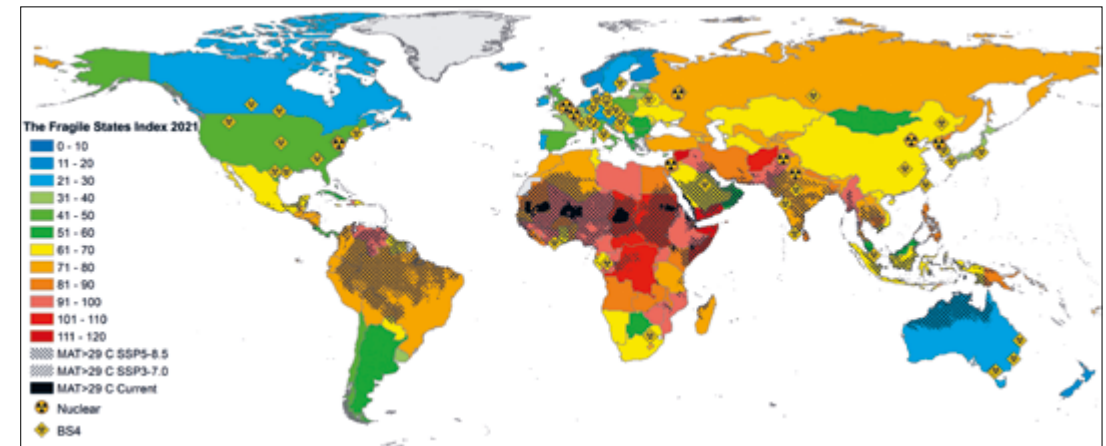


Abb. 2: Fragile Hitze: die Überschneidung zwischen staatlicher Fragilität, extremer Hitze und nuklearen und biologischen Katastrophenrisiken. GCM-Modelldaten [aus der WorldClim-Datenbank⁵²] wurden verwendet, um mittlere jährliche Erwärmungsraten unter SSP3-7.0 und SSP5-8.5 zu berechnen. Daraus ergibt sich ein Temperaturanstieg von 2,8 °C in ~2070⁵³ für SSP3-7.0 und 3,2 °C für SSP5-8.5. Die schattierten Bereiche zeigen Regionen, in denen MAT 29 °C überschreitet. Diese Projektionen werden mit dem Fragile State Index (FSI) von 2021⁵⁴ überlagert. Dies ist ein notwendigerweise grober Näherungswert, da der FSI nur den aktuellen Grad der Fragilität schätzt. Während solche Messungen von Fragilität und Stabilität umstritten sind und ihre Grenzen haben, stellt der FSI einen der robusteren Indizes dar. In dieser Abbildung sind auch die Hauptstädte von Staaten mit Atomwaffen

⁵² WORLDCLIM (2020) (wie Anm. 50).

⁵³ MEINSHAUSEN, M. ET AL. (2011): „Free Climate Data for Ecological Modeling and GIS“, in: *Climatic Change* 109, S. 213–241.

⁵⁴ FUND FOR PEACE (2021): *Fragile States Index 2021*. <https://fragilestatesindex.org/>.

Und schließlich könnte der Klimawandel die Fähigkeit der Menschheit, sich von einem anderen Kataklysmus, etwa einem Atomkrieg zu erholen, unwiderruflich untergraben. Das heißt, er könnte erhebliche latente Risiken schaffen (Tabelle 1): Auswirkungen, die in Zeiten der Stabilität vielleicht noch überschaubar sind, werden fatal in Zeiten der Reaktion und Erholung von einer Katastrophe. Diese verschiedenen Gründe zur Besorgnis über Katastrophen sind miteinander verknüpft und müssen gemeinsam untersucht werden.

Definition der Schlüsselbegriffe

Obwohl die Bad-to-Worst-Szenarien in der wissenschaftlichen Literatur noch nicht ausreichend erforscht sind, sind Aussagen, die den Klimawandel als katastrophal bezeichnen, keine Seltenheit. UN-Generalsekretär Antonio Guterres nannte den Klimawandel eine „existenzielle Bedrohung“. Akademische Studien haben davor gewarnt, dass eine Erwärmung von mehr als 5 °C wahrscheinlich „mehr als katastrophal“ ist⁵⁶ und mehr als 6 °C „eine unbestreitbare globale Katastrophe“ darstellt.⁵⁶

Die aktuelle Diskussion über die Klimakatastrophe wird durch eine unklare Terminologie untergraben. Der Begriff „katastrophaler Klimawandel“ wurde noch nicht schlüssig definiert. Ein existenzielles Risiko wird üblicherweise als ein Risiko definiert, das einen dauerhaften und signifikanten Verlust des langfristigen menschlichen Entwicklungsvermögens verursacht.⁵⁷ Diese bestehende Definition ist sehr vieldeutig und erfordert eine gesellschaftliche Diskussion und die Festlegung von langfristigen menschlichen Werten.⁵⁸ Während demokratische Erkundungen von Werten als begrüßenswert gelten, wird kaum danach gefragt, wie Pfadverläufe in eine menschliche Katastrophe oder Auslöschung zu verstehen sind.⁵⁹ Bisher ist die bestehende Definition jedenfalls keine solide Grundlage für wissenschaftliche Untersuchungen.

In Tabelle 1 finden sich klarere Arbeitsdefinitionen für diese Begriffe. Dies ist ein erster Schritt zur Erstellung eines Lexikons für die globale Katastrophe. Einige der Begriffe, z.B. was ein „plausibles“ Risiko oder einen „signifikanten Verursacher“ ausmacht, sind zwangsläufig mehrdeutig. Andere, wie z.B. der Schwellenwert von 10 % oder 25 % der Weltbevölkerung, sind teilweise willkürlich (10 % ist als Markierung für einen vorangegangenen Verlust gedacht und 25 % für einen noch nie dagewesenen Rückgang).⁶⁰ Weitere Forschung ist erforderlich, um diese Definitionen zu präzisieren. Die Schwellenwerte für globale Katastrophen- und Dezimierungs-

⁵⁶ XU, Y./RAMANATHAN, V. (2017): „Well Below 2 °C: Mitigation Strategies for Avoiding Dangerous to Catastrophic Climate Changes“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 114, 39, S. 10315–10323. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618481114>.

⁵⁶ WAGNER/WEITZMAN (2015) (wie Anm. 11).

⁵⁷ ORD, T. (2020): *The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity*, London: Bloomsbury. CREMER, C.Z./KEMP, L. (2021): „Democratizing Risk: In Search of a Methodology to Study Existential Risk“, in: *SSRN* [Preprint]. <https://ssrn.com/abstract=3995225>.

⁵⁸ SIEHE CREMER/KEMP (2021) (wie Anm. 57).

⁵⁹ Ebd.

⁶⁰ Siehe den SI-Anhang für weitere Diskussionen: <https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2108146119>.

risiken sind als allgemeine Heuristik und nicht als konkrete numerische Grenzen gedacht. Andere Faktoren wie Morbidität sowie kulturelle und wirtschaftliche Verluste müssen berücksichtigt werden.

Wir definieren Risiko als die Wahrscheinlichkeit, dass die Auswirkungen des Klimawandels und die Reaktionen darauf nachteilige Folgen für menschliche oder ökologische Systeme haben werden. Im Rahmen der Climate-Endgame-Agenda sind wir besonders an katastrophalen Folgen interessiert. Jedes Risiko setzt sich aus vier Determinanten zusammen: Gefahrenumstand, Belastungsgrad, Vulnerabilität und Reaktion.⁶¹

Wir haben eine globale Erwärmung von 3 °C oder mehr bis zum Ende des Jahrhunderts als Grenzwert für extreme Klimaänderungen festgelegt. Dieser Schwellenwert wurde aus vier Gründen gewählt: Ein solcher Temperaturanstieg geht weit über die international vereinbarten Ziele hinaus, alle IPCC-„Gründe zur Besorgnis“ in Bezug auf die Klimaauswirkungen sind entweder „hoch“ oder „sehr hoch“ zwischen 2 °C und 3 °C, es gibt ein wesentlich höheres Risiko sich selbst verstärkender Veränderungen, die eine Begrenzung der Erwärmung auf 3 °C unmöglich machen würden, und diese Werte sind mit einer weitaus größeren Unsicherheit in Bezug auf die Auswirkungen verbunden.

Tabelle 1: Definition von Schlüsselbegriffen in der Climate-Endgame-Agenda

BEGRIFF	DEFINITION
Latentes Risiko	Risiko, das unter einer Reihe von Bedingungen ruht, aber unter einer anderen Reihe von Bedingungen aktiv wird.
Risikokaskade	Risikoketten, die entstehen, wenn eine nachteilige Auswirkung eine Reihe von miteinander verbundenen Risiken auslöst. ⁶²
Systemisches Risiko	Die Möglichkeit, dass einzelne Störungen oder Ausfälle kaskadenartig zu einem systemweiten Ausfall führen.
Extremer Klimawandel	Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur um 3 °C oder mehr gegenüber dem vorindustriellen Niveau bis 2100.
Risiko des Aussterbens	Die Wahrscheinlichkeit, dass der Mensch innerhalb eines bestimmten Zeitraums ausstirbt.
Drohendes Aussterben	Ein plausibler und bedeutender Beitrag zum Gesamtaussterberisiko.
Gesellschaftliche Fragilität	Das Potenzial, dass sich kleinere Schäden aufgrund gesellschaftlicher Vulnerabilitäten, Risikokaskaden und unangepasster Reaktionen zu einem globalen Katastrophen- oder Aussterberisiko hochschrauben.

⁶¹ SIMPSON ET AL. (2021) (wie Anm. 4).

⁶² Ebd.

Gesellschaftlicher Zusammenbruch	Erhebliche soziopolitische Zersplitterung und/oder Staatszerfall in Verbindung mit einem relativ raschen, dauerhaften und erheblichen Verlust an Kapital und Systemidentität; dies kann zu einem massiven Anstieg der Mortalität und Morbidität führen.
Globales Katastrophenrisiko	Die Wahrscheinlichkeit eines Verlusts von 25 % der Weltbevölkerung und einer schwerwiegenden Störung globaler kritischer Systeme (z. B. der Nahrungsmittelversorgung) innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Jahre oder Jahrzehnte).
Globale katastrophale Bedrohung	Ein plausibler und signifikanter Beitrag zum globalen Katastrophenrisiko; das Potenzial des Klimawandels, eine globale katastrophale Bedrohung darzustellen, kann als „katastrophaler Klimawandel“ bezeichnet werden.
Globales Dezimierungsrisiko	Die Wahrscheinlichkeit eines Verlusts von 10 % (oder mehr) der Weltbevölkerung und einer schwerwiegenden Störung globaler kritischer Systeme (wie z. B. der Nahrungsmittelversorgung) innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Jahre oder Jahrzehnte).
Globale Dezimierungsbedrohung	Ein plausibler und bedeutender Beitrag zum globalen Dezimierungsrisiko.
Endgame-Territorium	Ebenen der globalen Erwärmung und der Vulnerabilität der Gesellschaft, die als hinreichend wahrscheinlich erachtet werden, um den Klimawandel als Bedrohung für das Aussterben zu betrachten.
Worst-Case-Erwärmung	Das höchste empirisch und theoretisch plausible Niveau der globalen Erwärmung.

Grundlegende Forschungsarbeiten bisher

Am ehesten wurde in populärwissenschaftlichen Büchern wie *Die unbewohnbare Erde* ⁶³ und *6 Grad mehr* ⁶⁴ versucht, direkt zu untersuchen oder umfassend darzustellen, wie der Klimawandel zum Aussterben der Menschheit oder zu einer globalen Katastrophe führen könnte. Letzteres, ein Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels in verschiedenen Ausprägungen, kommt zu dem Schluss, dass ein globaler Temperaturanstieg von 6 °C „sogar das Überleben der Menschen als Spezies gefährdet“. ⁶⁵

Wir wissen, dass sich die Gesundheitsrisiken mit steigenden Temperaturen verschlechtern. ⁶⁶ So steigt mit höheren Temperaturen bereits die Wahrscheinlichkeit multipler globaler Ernteausfälle, die einen Preisschock bei Lebensmitteln verursachen. ⁶⁷ Für die vier größten Maiserzeugerregionen (auf die 87 % der Maiserzeugung entfallen) steigt die Wahrscheinlichkeit von mehr als 10 % Produktionsverlusten von 7 % jährlich bei einem 2 °C-Temperaturanstieg auf 86 % bei 4 °C Anstieg. ⁶⁸ Der IPCC stellt in seinem Sechsten Sachstandsbericht fest, dass 50 bis 75 % der Weltbevölkerung

⁶³ WALLACE-WELLS, D. (2019): *The Uninhabitable Earth*, New York, NY: Crown; dt.: *Die unbewohnbare Erde. Leben nach der Erderwärmung*. München: Ludwig.

⁶⁴ LYNAS (2020) (wie Anm. 12).

⁶⁵ Ebd.

⁶⁶ EBI, K.L. ET AL. (2018): „Health Risks of Warming of 1.5°C, 2°C, and Higher, Above Pre-Industrial Temperatures“. *Environmental Research Letters* 13, 063007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac4bd>.

⁶⁷ GAUPP, F./HALL, J./HOCHRAJNER-STIGLER, S./DADSON, S. (2020): „Changing Risks of Simultaneous Global Breadbasket Failure“, in: *Nature Climate Change* 10, S. 54–57. <https://www.nature.com/articles/s41558-019-0600-z>.

bis zum Ende des Jahrhunderts aufgrund extremer Hitze und Feuchtigkeit lebensbedrohlichen Klimabedingungen ausgesetzt sein könnten. ⁶⁹

Die IPCC-Berichte fassen die von Fachleuten überprüfte Literatur zum Klimawandel, zu den Auswirkungen und Vulnerabilitäten sowie zur Mitigation zusammen. Obwohl im Beitrag der Arbeitsgruppe 1 zum Sechsten Sachstandsbericht 15 Kippelemente in der Biosphäre, den Ozeanen und der Kryosphäre identifiziert wurden, viele davon mit irreversiblen Schwellenwerten, gab es nur sehr wenige Veröffentlichungen zu Katastrophenszenarien, die bewertet werden konnten. Am bemerkenswertesten sind die „Gründe zur Besorgnis“-Synthesen der Arbeitsgruppe II, die seit 2001 veröffentlicht wurden. Diese Synthesen wurden erstellt, um zu bestimmen, was eine „gefährliche anthropogene Störung“ des Klimasystems ist, die das UNFCCC verhindern will. Die fünf Besorgnisse sind: einzigartige und bedrohte Ökosysteme, Häufigkeit und Schwere extremer Wetterereignisse, globale Verteilung und Gleichgewicht der Auswirkungen, wirtschaftliche und ökologische Gesamtauswirkungen sowie unumkehrbare, großflächige und abrupte Übergänge. Bei jeder der IPCC-Auswertungen wurde festgestellt, dass bei einem geringeren Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen größere Risiken auftreten. Im Sechsten Sachstandsbericht wurden alle fünf Besorgnisse bei Temperaturen von 1,2 °C bis 4,5 °C als sehr hoch eingestuft. Im Gegensatz dazu wurden im vorhergehenden Bewertungsbericht ⁷⁰ nur zwei Probleme in diesem Temperaturintervall als sehr hoch eingestuft. Alle fünf Besorgnisse werden nun als „hoch“ oder „sehr hoch“ für eine Erwärmung von 2 °C bis 3 °C eingestuft. ⁷¹

Eine beispielhafte Forschungsagenda: Extreme Erdsystemzustände, Massensterben, gesellschaftliche Fragilität und integrierte Klimakatastrophenabschätzungen

Wir schlagen eine Forschungsagenda für den katastrophalen Klimawandel vor, die sich auf vier Schlüsselbereiche konzentriert:

- Verständnis der Dynamik extremer Klimaänderungen und ihrer langfristigen Auswirkungen
- Erforschung klimabedingter Wege zu Massenmorbidity und -sterblichkeit
- Untersuchung der sozialen Fragilität: Vulnerabilitäten, Risikokaskaden und Risikoreaktionen
- Synthese der Forschungsergebnisse zu „integrierten Katastrophenbewertungen“

⁶⁸ TIGCHELAAR, M./BATTISTI, D.S./NAYLOR, R.L./RAY, D.K. (2018): „Future Warming Increases Probability of Globally Synchronized Maize Production Shocks“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 115, 26, S. 6644–6649. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718031115>.

⁶⁹ IPCC (2022) (wie Anm. 8). Der SI-Anhang enthält weitere Einzelheiten zu mehreren wichtigen Studien über extreme Klimaänderungen: <https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2108146119>.

⁷⁰ Ebd.

⁷¹ ZOMMERS, Z. ET AL. (2020): „Burning Embers: Economic Impacts of Tipping Points in the Climate System“, in: *Nature Reviews Earth & Environment* 1, S. 516–529. <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-020-0088-0>.

Die von uns vorgeschlagene Agenda baut auf integrierten Bewertungsmodellen auf, die derzeit angepasst werden, um Schäden in großem Maßstab besser bewerten zu können. Es wurde eine Reihe von Kipp-Punkten bewertet, ⁽⁷²⁾ wobei die Auswirkungen von einer 10-prozentigen Wahrscheinlichkeit auf Verdopplung der sozialen Kosten von Kohlenstoff ⁽⁷³⁾ bis hin zu einer Verachtfachung des optimalen Kohlenstoffpreises reichen. ⁽⁷⁴⁾ Dies spiegelt frühere Erkenntnisse wider, wonach die Wohlfahrtsschätzungen von den „Fat-Tail“-Risiken abhängen. ⁽⁷⁵⁾ Modellannahmen wie Diskontsätze, exogene Wachstumsraten, Risikopräferenzen und Schadensfunktionen beeinflussen die Ergebnisse ebenfalls stark.

In diesen (bisherigen) Modellen fehlen jedoch große, wichtige Aspekte, die in unserer Forschungsagenda hervorgehoben werden: längerfristige Auswirkungen unter extremen Klimaänderungen, Wege zu Massenmorbidity und -sterblichkeit sowie die Risikokaskaden und systemischen Risiken, die extreme Klimaauswirkungen auslösen könnten. Fortschritte in diesen Bereichen würden realistischere Modelle und Schadensfunktionen ermöglichen und dazu beitragen, direkte Schätzungen von Todesopfern zu liefern, ⁽⁷⁶⁾ ein notwendiges moralisches, nicht-ökonomisches Maß für das Klimarisiko. Wir fordern die Forschungsgemeinschaft dringend auf, integrierte konzeptionelle und semiquantitative Modelle von Klimakatastrophen zu entwickeln.

Schließlich laden wir andere Wissenschaftler*innen ein, diese vorgeschlagene Agenda zu überarbeiten und zu verbessern.

Extreme Zustände des Erdsystems

Wir müssen verstehen, wie mögliche langfristige Zustände des Erdsystems unter extremen Klimaänderungen aussehen. Dies bedeutet, dass wir verschiedene „Hothouse-Earth“-Szenarien ⁽⁷⁷⁾ oder andere Extremszenarien, wie alternative Zirkulationsregime oder große, irreversible Veränderungen der Eisbedeckung und des Meeresspiegels, kartieren müssen. Diese Forschung erfordert die Berücksichtigung der langfristigen Klimadynamik und ihrer Auswirkungen auf andere Prozesse auf planetarer Ebene. Die Forschung deutet darauf hin, dass frühere Massenaussterben aufgrund von Schweleneffekten im Kohlenstoffkreislauf auftraten, die wir in diesem Jahrhundert überschreiten könnten. ⁽⁷⁸⁾ Wichtige Auswirkungen früherer Massenaussterben, wie Hypoxie und Anoxie der Ozeane, könnten sich längerfristig ebenfalls verstärken. ⁽⁷⁹⁾

Die Untersuchung potenzieller Kippunkte und irreversibler

⁽⁷²⁾ DIETZ, S./RISING, J./STOERK, T./WAGNER, G. (2021): „Economic Impacts of Tipping Points in the Climate System“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 118, 34, e2103081118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2103081118>. LONTZEK, T.S./CAI, Y./JUDD, K.L./LENTON, T.M. (2015): „Stochastic Integrated Assessment of Climate Tipping Points Indicates the Need for Strict Climate Policy“, in: *Nature Climate Change* 5, S. 441–444. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2570>. CAI, Y./LENTON, T.M./LONTZEK, T.S. (2016): „Risk of Multiple Interacting Tipping Points Should Encourage Rapid CO₂ Emission Reduction“, in: *Nature Climate Change* 6, S. 520–528. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2964>.

⁽⁷³⁾ LENZEN, M. ET AL. (2017): „The Global MRIO Lab – Charting the World Economy“, in: *Economic Systems Research*, 29, S. 158–186. <https://doi.org/10.1080/09535314.2017.1301887>.

⁽⁷⁴⁾ CAI ET AL. (2016) (wie Anm. 72).

⁽⁷⁵⁾ DIETZ (2011) (wie Anm. 34).

⁽⁷⁶⁾ NOLT, J. (2015): „Casualties as a Moral Measure of Climate Change“, in: *Climatic Change* 130, S. 347–358. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-014-1131-2>.

⁽⁷⁷⁾ STEFFEN ET AL. (2018) (wie Anm. 23).

⁽⁷⁸⁾ ROTHMAN (2017) (wie Anm. 43).

⁽⁷⁹⁾ ROTHMAN (2017) (wie Anm. 43) sowie PENN, J.L./DEUTSCH, C./PAYNE, J.L./SPERLING, E.A. (2018): „Temperature-Dependent Hypoxia Explains Biogeography and Severity of End-Permian Marine Mass Extinction“, in: *Science* 362, 6419, eaat1327. <https://doi.org/10.1126/science.aat1327>.

Veränderungen von Umwelt- und Klimasystemen ist von wesentlicher Bedeutung. Die Modellierung des antarktischen Eisschildes lässt beispielsweise darauf schließen, dass es mehrere Kippunkte gibt, die eine Hysterese ⁽⁸⁰⁾ aufweisen. ⁽⁸¹⁾ Es wurde festgestellt, dass der irreversible Verlust des westantarktischen Eisschildes bei einer globalen Erwärmung von ~2°C ausgelöst wird, und dass die derzeitige Konfiguration des Eisschildes nicht wiederhergestellt werden kann, selbst wenn die Temperaturen auf das heutige Niveau zurückkehren. Bei einem globalen Temperaturanstieg von 6°C bis 9°C könnte es zu einem langsamen, irreversiblen Verlust des ostantarktischen Eisschildes und einem Anstieg des Meeresspiegels um mehr als 40 m kommen. ⁽⁸²⁾ Ähnliche Studien über Gebiete wie den grönländischen Eisschild, den Permafrost und die terrestrische Vegetation wären hilfreich. Die Ermittlung aller potenziellen Kippelemente des Erdsystems ist von entscheidender Bedeutung. Mitbedacht werden sollten dabei auch Abwägungen zu umfassenderen planetaren Grenzen wie die biologische Vielfalt, die Kippunkte beeinflusst, ⁽⁸³⁾ sowie Rückkopplungen über das Klimasystem hinaus und die Art und Weise, wie Kippelemente zusammenwirken könnten. ⁽⁸⁴⁾

Massenmorbidity und -sterblichkeit

Es gibt viele potenzielle Faktoren, die zur klimabedingten Morbidity und Mortalität beitragen, aber die „vier apokalyptischen Reiter“ des Klimawandels sind wahrscheinlich Hunger und Unterernährung, extreme Wetterereignisse, Konflikte und vektorübertragene Krankheiten. Diese werden durch zusätzliche Risiken und Effekte wie die Sterblichkeit durch Luftverschmutzung und den Anstieg des Meeresspiegels noch verschlimmert werden.

Diese Zusammenhänge müssen weiter untersucht werden. Empirische Schätzungen selbst der direkten Todesfälle durch Hitzestress in den Vereinigten Staaten werden bisher systematisch unterschätzt. ⁽⁸⁵⁾ Eine Überprüfung der Literatur zum Thema Gesundheit und Klimawandel von 1985 bis 2013 (mit einer Annäherung bis 2017) ergab, dass von 2.143 Artikeln nur 189 (9%) eine spezielle Diskussion über extremere gesundheitliche Auswirkungen oder systemische Risiken (im Zusammenhang mit Migration, Hungersnot oder Konflikten) enthielten. ⁽⁸⁶⁾ Auch Anpassungsreaktionen werden in den Modellen nur selten berücksichtigt. Daher sind die Schätzungen der Gesamtsterblichkeit unsicher.

Wie lässt sich die potenzielle Massenmorbidity und -sterblichkeit besser einkalkulieren? 1) Verfolge Compound

⁽⁸⁰⁾ [Zeitlich verzögerter Eintritt der durch eine Ursache hervorgerufenen Änderung, a.d.Ü.]

⁽⁸¹⁾ GARBE, J./ALBRECHT, T./LEVERMANN, A./DONGES, J.F./WINKELMANN, R. (2020): „The Hysteresis of the Antarctic Ice Sheet“, in: *Nature* 585, S. 538–544. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2727-5>.

⁽⁸²⁾ Ebd.

⁽⁸³⁾ ROCKSTRÖM, J. ET AL. (2021): „We Need Biosphere Stewardship That Protects Carbon Sinks and Builds Resilience“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 118, 38, e2115218118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115218118>.

⁽⁸⁴⁾ WUNDERLING, N./DONGES, J.F./KURTHS, J./WINKELMANN, R. (2021): „Interacting Tipping Elements Increase Risk of Climate Domino Effects Under Global Warming“, in: *Earth System Dynamics* 12, 2, S. 601–619. <https://doi.org/10.5194/esd-12-601-2021>.

⁽⁸⁵⁾ WEINBERGER, K.R./HARRIS, D./SPANGLER, K.R./ZANOBETTI, A./WELLENIUS, G.A. (2020): „Estimating the Number of Excess Deaths Attributable to Heat in 297 United States Counties“, in: *Environmental Epidemiology* 4, 3, e096. <https://doi.org/10.1097/EE9.000000000000096>.

⁽⁸⁶⁾ BUTLER, C.D. (2018): „Climate Change, Health and Existential Risks to Civilization: A Comprehensive Review (1989–2013)“, in: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15, 10, 2266. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102266>

Hazards durch Bottom-up-Modellierung von Systemen und Schwachstellen ⁸⁷ und führe rigorose Stresstests durch. ⁸⁸ 2) Anwendung der Modelle auf Szenarien mit höheren Temperaturen und längeren Zeiträumen. 3) Risikokaskaden und systemische Risiken (siehe den folgenden Abschnitt) in die Bewertung von Gesundheitsrisiken einbeziehen, z.B. durch Einbeziehung von Morbidität und Mortalität infolge eines klimabedingten Lebensmittelpreisschocks.

Gesellschaftliche Fragilität: Vulnerabilitäten, Risikokaskaden und Risikoresponsivitäten

Komplexere Risikobewertungen sind im Allgemeinen realistischer. Die Determinanten des Risikos sind nicht nur Gefahrenumstand, Vulnerabilität und Belastungsgrad, sondern auch die Art der Reaktion. ⁸⁹ Berücksichtigt werden müssen bei einer vollständigen Risikobewertung: die Wucht klimatischer Effekte, die differentiellen Belastungsgrade, systemische Vulnerabilität, die Reaktion der Gesellschaft mit ihren Akteuren sowie die grenz- und sektorübergreifenden Auswirkungen, ⁹⁰ die potenziell zu systemischen Krisen führen können. Im schlimmsten Fall könnte ein Dominoeffekt oder eine Spirale das ursprüngliche Risiko kontinuierlich verschlimmern.

Gesellschaftliche Risikokaskaden könnten Konflikte, Krankheiten, politische Veränderungen und Wirtschaftskrisen umfassen. Der Klimawandel steht in einer komplizierten Beziehung zu Konflikten, möglicherweise auch als Risikofaktor, ⁹¹ insbesondere in Gebieten mit bereits bestehenden ethnischen Konflikten. ⁹² Der Klimawandel könnte die Ausbreitung und Übertragung von Infektionskrankheiten sowie die Ausbreitung und den Schweregrad verschiedener Zoonosen ⁹³ beeinflussen und damit die Voraussetzungen für neuartige Ausbrüche und Infektionen schaffen. ⁹⁴ Epidemien können ihrerseits kaskadenartige Auswirkungen auslösen, wie im Fall von COVID-19. Das Maß der Konfrontation mit Umweltbelastungen und Naturkatastrophen ist ein entscheidender Faktor für die kulturelle „Enge“ (Strenge der Regeln, Festhalten an der Tradition und Strenge der Bestrafung) von Gesellschaften. ⁹⁵ Die Literatur zu den mittleren wirtschaftlichen Schäden des Klimawandels ist umfangreich, aber es wurde weitaus weniger geschrieben über finanzielle Folgerisiken, wie etwa die Möglichkeit globaler Finanzkrisen.

Bei der Untersuchung des gesellschaftlichen Risikos könnte auf frühere Studien zurückgegriffen werden. Relativ kleine, regionale Klimaveränderungen werden mit dem Wandel und sogar dem Zusammenbruch früherer Gesellschaften in Verbindung gebracht. ⁹⁶ Dies könnte auf eine abnehmende

⁸⁷ ZSCHEISCHLER, J. ET AL. (2018): „Future Climate Risk From Compound Events“, in: *Nature Climate Change* 8, S. 469–477. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>.

⁸⁸ EBI, K.L. ET AL. (2018): „Stress Testing the Capacity of Health Systems to Manage Climate Change-Related Shocks and Stresses“, in: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15, 11, 2370. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112370>.

⁸⁹ SIMPSON ET AL. (2021) (wie Anm. 4) sowie REISINGER, A. ET AL. (2020): „The Concept of Risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A Summary of Cross-Working Group Discussions“. Genf: International Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/event/guidance-note-concept-of-risk-in-the-6ar-cross-wg-discussions/>.

⁹⁰ CHALLINOR, A.J. ET AL. (2018): „Transmission of Climate Risks Across Sectors and Borders“, in: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376, 20170301. <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0301>.

⁹¹ MACH, K.J. ET AL. (2019): „Climate as a Risk Factor for Armed Conflict“, in: *Nature* 571, S. 193–197. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1300-6>.

⁹² SCHLEUSSNER, C.-F./DONGES, J.F./DONNER, R.V./SCHELLNHUBER, H.J. (2016): „Armed-Conflict Risks Enhanced by Climate-Related Disasters in Ethnically Fractionalized Countries“. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 113, 33, S. 9216–9221. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601611113>.

⁹³ RUPASINGHE, R./CHOMEL, B.B./MARTÍNEZ-LÓPEZ, B. (2022): „Climate Change and Zoonoses: A Review of the Current Status, Knowledge Gaps, and Future Trends“, in: *Acta Tropica* 226, 106225. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2021.106225>.

Resilienz und das Überschreiten von Kippunkten in diesen Gesellschaften zurückzuführen sein. Es gibt einige Hinweise auf eine kritische Verlangsamung in Gesellschaften vor ihrem Zusammenbruch. ⁹⁷ Sorgfältiges Vorgehen ist jedoch geboten, wenn man Lehren aus Fallstudien zur Vormoderne ziehen will. Die Vorgeschichte und die Geschichte sollten nicht nur unter dem Aspekt untersucht werden, wie frühere Gesellschaften von bestimmten Klimagefahren betroffen waren, sondern auch, wie sich diese Auswirkungen verändern, wenn sich die Gesellschaften z.B. in Bezug auf die Bevölkerungsdichte, die Ungleichheit des Wohlstands und das Regierungssystem verändern. Ein solcher Rahmen wird es ermöglichen, vergangene und gegenwärtige Gesellschaften in ein einziges Analysesystem einzubinden. ⁹⁸

Die Charakteristiken und Vulnerabilitäten einer modernen globalisierten Welt, in der Lebensmittel- und Transportverteilungssysteme Traumata abpuffern können, müssen in Arbeiten zur sozialen Sensibilität berücksichtigt werden. Derart große, miteinander verbundene Systeme bringen ihre eigenen Quellen der Fragilität mit sich, insbesondere wenn relativ homogene Netzwerke über einige wenige dominante Knotenpunkte hochgradig mit allen anderen verbunden sind. ⁹⁹ Andere wichtige moderne Schwachstellen liegen in der schnellen Verbreitung von Fehlinformationen und Desinformationen. Diese epistemischen Risiken sind ein ernstes Problem bei Krisen im Bereich der öffentlichen Gesundheit ¹⁰⁰ und haben bereits Klimaschutzmaßnahmen behindert. Eine vereinfachte Darstellung, wie sich Risikokaskaden entfalten könnten, findet sich in Abb. 3.

Integrierte Katastrophenabschätzungen

Der Klimawandel wird sich in einer Welt der sich verändernden Ökosysteme, Geopolitiken und Technologien vollziehen. Könnte es sogar zu „Klimakriegen“ kommen – technologisch verstärkte Großmachtkonflikte um schwindende Kohlenstoffbudgets, Klimaauswirkungen oder SRM-Experimente? Solche Entwicklungen und Szenarien müssen berücksichtigt werden, um ein vollständiges Bild der Klimagefahren zu erhalten. Der Klimawandel könnte weitere, miteinander interagierende Bedrohungen verstärken, wie z.B. zunehmende Ungleichheit, demografischer Druck, Fehlinformationen, neue zerstörerische Waffensysteme und das Überschreiten anderer planetarer Grenzen. ¹⁰¹ Es gibt auch natürliche Schocks wie Sonneneruptionen und heftige Vulkanausbrüche, die möglicherweise zu fatalen Synchronizitäten führen. ¹⁰² Diese zu erforschen ist unerlässlich, und eine Reihe von

⁹⁴ IPCC 2022 (wie Anm. 8) sowie GIBB, R./FRANKLINOS, L.H.V./REDDING, D.W./JONES, K.E. (2020): „Ecosystem Perspectives Are Needed to Manage Zoonotic Risks in a Changing Climate“, in: *BMJ* 371, m3389. <https://doi.org/10.1136/bmj.m3389>.

⁹⁵ GELFAND, M.J. ET AL. (2011): „Differences Between Tight and Loose Cultures: A 33-Nation Study“, in: *Science* 332, S. 1100–1104. <https://doi.org/10.1126/science.1197754>.

⁹⁶ CLINE, E.H. (2021): 1177 B.C.: *The Year Civilization Collapsed: Revised and Updated*, Princeton, NJ: Princeton University Press. ZHANG, D.D. ET AL. (2006): „Climatic Change, Wars and Dynastic Cycles in China Over the Last Millennium“, in: *Climatic Change* 76, S. 459–477. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-005-9024-z>.

⁹⁷ SCHEFFER, M./VAN NES, E.H./BIRD, D./BOCINSKY, R.K./KÖHLER, T.A. (2021): „Loss of Resilience Preceded Transformations of Pre-Hispanic Pueblo Societies“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 118, 18, e2024397118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2024397118>.

SCHEFFER, M. (2016): „Anticipating Societal Collapse; Hints from the Stone Age“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 113, 39, S. 10733–10735. <https://doi.org/10.1073/pnas.1612728113>.

⁹⁸ KÖHLER/ROCKMAN (2020) (wie Anm. 41).

⁹⁹ SCHEFFER, M. ET AL. (2012): „Anticipating Critical Transitions“, in: *Science* 338, 6105, S. 344–348. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1225244>.

¹⁰⁰ KEMP, L. ET AL. (2021): *Emerging Technologies and Dual-Use Concerns: A Horizon Scan for Global Public Health*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036161>. Geneva: World Health Organization.

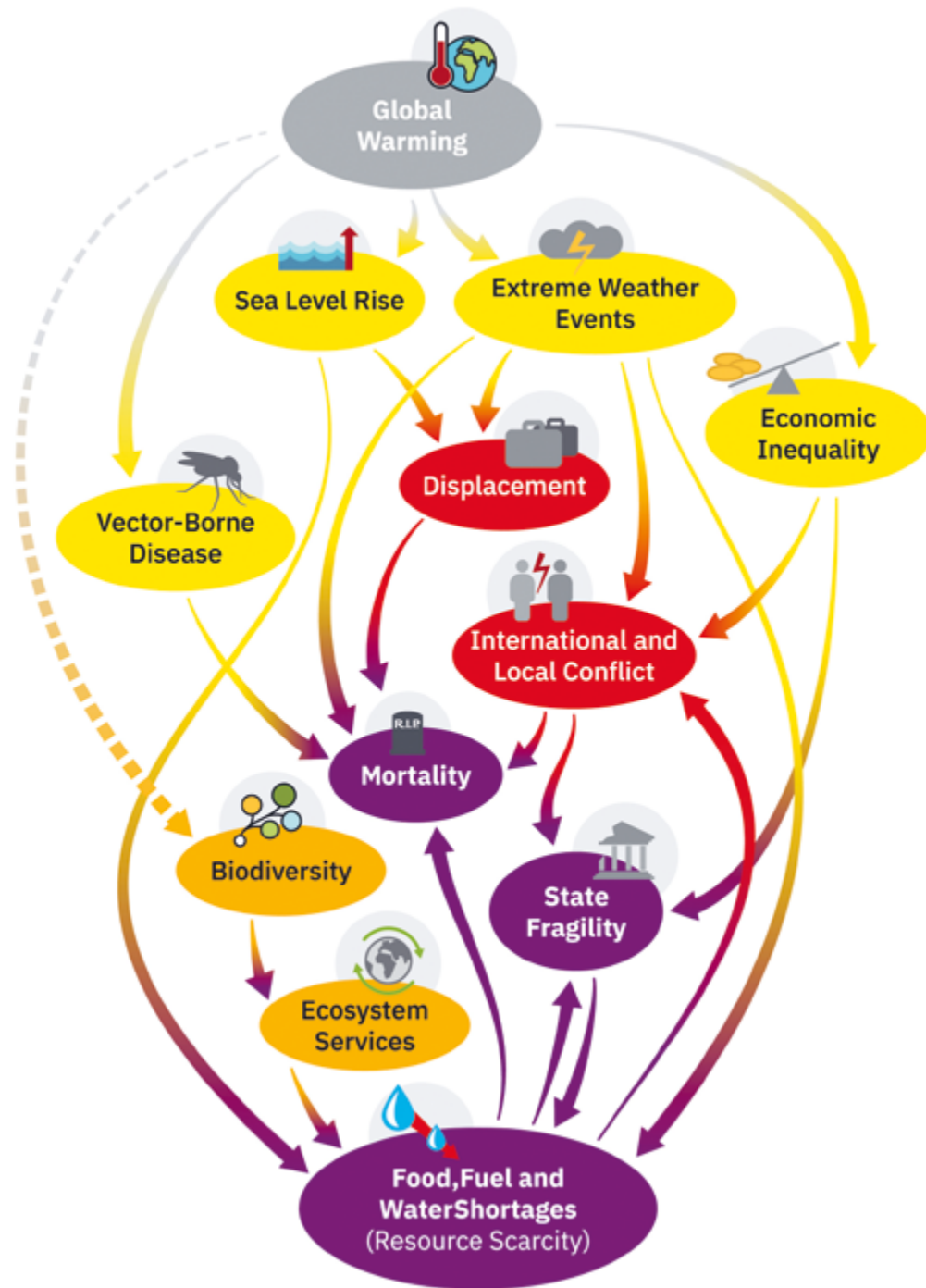


Abb. 3. Kaskadierendes globales Klimaversagen. Dies ist ein Kausalschleifendiagramm, in dem eine durchgezogene Linie eine positive Polarität darstellt (z.B. eine verstärkende Rückkopplung; nicht unbedingt positiv im normativen Sinne) und eine gepunktete Linie eine negative Polarität (d. h. eine dämpfende Rückkopplung). ⁽¹⁰¹⁾

„standardisierten Katastrophenszenarien“ würde die Bewertung erleichtern.

Expertenbefragung, Systemkartierung und partizipative Szenarien bieten vielversprechende Möglichkeiten, solche Kaskaden zu verstehen. ⁽¹⁰⁴⁾ Für einige dieser Bereiche gibt es auch bereits Forschungspläne, die finanziert werden könnten. ⁽¹⁰⁵⁾

Die Integration kann auf verschiedene Weise angegangen werden. Metareviews und Zusammenfassungen von Forschungsergebnissen können nützliche Daten für die Kartierung der Wechselwirkungen zwischen Risiken liefern. Dies könnte durch Kausalkartierung, Expertenbefragung und agentenbasierte oder systemdynamische Modellierungsansätze geschehen. In einer kürzlich durchgeführten Studie wurde die Evidenzbasis für die Beziehungen zwischen Klimawandel, Ernährungsunsicherheit und den Faktoren, die zum gesellschaftlichen Zusammenbruch beitragen (Sterblichkeit, Konflikte und Auswanderung), auf der Grundlage von 41 Studien kartiert. ⁽¹⁰⁶⁾

Ein besonders vielversprechender Weg ist die Umwidmung bestehender komplexer Modelle zur Untersuchung von Kaskadenrisiken. Das resultierende Netzwerk könnte mit standardisierten Katastrophenszenarien einem „Stresstest“ unterzogen werden. Auf diese Weise ließe sich abschätzen, in welchen Gebieten es zu kritischen Engpässen oder Unterbrechungen oder zu drastischen Reaktionen (z.B. Exportverbote für Lebensmittel) kommen könnte. Komplexe Modelle wurden entwickelt, um frühere große Systemkatastrophen wie die globale Finanzkrise 2007–2008 zu verstehen. ⁽¹⁰⁷⁾ Einige dieser Modelle könnten für die Erforschung der potenziellen Natur einer künftigen globalen Klimakrise wiederverwendet werden.

Es ist unwahrscheinlich, dass ein Systemversagen weltweit gleichzeitig auftritt; es ist wahrscheinlicher, dass es regional beginnt und sich dann kaskadenartig nach oben ausbreitet. Obwohl das Ziel darin besteht, das Klimakatastrophenrisiko global zu untersuchen, ist die Einbeziehung von Kenntnissen über regionale Verluste unerlässlich.

Die potenziell katastrophalen Risiken des Klimawandels sind schwer zu quantifizieren, selbst mit Modellen. Jeder der oben genannten Modellierungsansätze sollte ein besseres Verständnis der Pfade des systemischen Risikos und grobe probabilistische Anhaltspunkte liefern. Die Ergebnisse könnten jedoch die Grundlage für argumentationsbasierte Instrumente zur Bewertung des Ausmaßes katastrophaler Folgen bei verschiedenen Temperaturanstiegsgraden bilden. ⁽¹⁰⁸⁾

⁽¹⁰¹⁾ Für weitere Informationen siehe den SI-Anhang: <https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2108146119>.

⁽¹⁰²⁾ STEFFEN, W. ET AL. (2015): „Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet“, in: *Science* 347, S. 736–748. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1259855>.

⁽¹⁰³⁾ MANI, L./TZACHOR, A./COLE, P. (2021): „Global Catastrophic Risk From Lower Magnitude Volcanic Eruptions“, in: *Nature Communications* 12, 4756. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25021-8>.

⁽¹⁰⁴⁾ CHALLINOR ET AL. (2018) (wie Anm. 90).

⁽¹⁰⁵⁾ MACH, K.J., ET AL. (2020): „Directions for Research on Climate and Conflict“, in: *Earth's Future* 8, e201532. <https://doi.org/10.1029/2020EF001532>.

⁽¹⁰⁶⁾ RICHARDS, C.E./LUPTON, R.C./ALLWOOD, J.M. (2021): „Re-Framing the Threat of Global Warming: An Empirical Causal Loop Diagram of Climate Change, Food Insecurity and Societal Collapse“, in: *Climatic Change* 164, 49. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-021-02957-w>.

⁽¹⁰⁷⁾ CACCIOLI, F., BARUCCA, P./KOBAYASHI, T. (2018): „Network Models of Financial Systemic Risk: A Review“, in: *Journal of Computational Social Science* 1, S. 81–114. <https://doi.org/10.1007/s42001-017-0008-3>.

⁽¹⁰⁸⁾ HANSSON, S.O./HIRSCH HADORN, G. (HRSG.) (2016): *The Argumentative Turn in Policy Analysis: Reasoning about Uncertainty*, Cham: Springer International.

Diese sollten in offene deliberative demokratische Methoden einfließen, die einen fairen, integrativen und effektiven Ansatz für die Entscheidungsfindung bieten. (109) Solche Ansätze könnten sich auf Instrumente zur Entscheidungsfindung unter Unsicherheit stützen, wie etwa das Minimax-Prinzip oder auch die Einstufung von Entscheidungen nach der gewichteten Summe ihrer besten und schlechtesten Ergebnisse, wie in P. Dasguptas Studie zur biologischen Vielfalt vorgeschlagen. (110)

Ein IPCC-Sonderbericht über katastrophale Klimaänderungen

Der IPCC muss jetzt dem katastrophalen Klimawandel fokussierte Beachtung schenken. Es wurden vierzehn Sonderberichte veröffentlicht. Keiner deckte extremen oder katastrophalen Klimawandel ab. Für den siebten IPCC-Bewertungszyklus wurde ein Sonderbericht über „Kipp-Punkte“ in Aussicht gestellt und wir schlagen vor, dass dieser Bericht auf alle Schlüsselaspekte des katastrophalen Klimawandels ausgeweitet wird. Dies scheint nach dem Entscheidungsrahmen des IPCC gerechtfertigt. (111) In einem solchen Bericht könnte untersucht werden, wie die Rückkopplungen des Erdsystems die Temperaturverläufe verändern könnten und ob diese unumkehrbar sind.

Ein Sonderbericht über den katastrophalen Klimawandel könnte dazu beitragen, weitere Forschungen anzustoßen, so wie es der Sonderbericht *Global Warming of 1.5 °C* (112) tat. Dieser Bericht löste auch eine Welle der öffentlichen Besorgnis über die Schwere der Auswirkungen in niedrigeren Temperaturbereichen aus. Die Auswirkungen eines Berichts über katastrophale Klimaveränderungen könnten sogar noch deutlicher sein. Er könnte dazu beitragen, den Blick dafür zu schärfen, wie viel in einem Worst-Case-Szenario auf dem Spiel steht. Die weitere Finanzierung der Forschung über katastrophale und Worst-Case-Klimaveränderungen ist von entscheidender Bedeutung.

Effektive Kommunikation der Forschung wird ein Kernelement sein. Zwar wird befürchtet, dass angstausslösende Botschaften nicht hilfreich sind und zu Lähmungserscheinungen führen können, (113) doch ist die Beweislage in Bezug auf hoffnungsvolle vs. angstbesetzte Botschaften uneinheitlich, selbst in Metaanalysen. (114) Die Rolle von Emotionen ist komplex, und es ist strategisch sinnvoll, Nachrichten auf bestimmte Zielgruppen anzupassen. (115) In einem kürzlich erschienenen Bericht über die Klimadebatte wurde hervorgehoben, wie wichtig es ist, ideologische Standpunkte zu vermeiden,

(109) ANDEMORE, H. (2020): *Open Democracy: Reinventing Popular Rule for the Twenty-First Century*, Princeton, NJ: Princeton University Press.

(110) DASGUPTA, P. (2021): *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*, London: HM Treasury. <https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>.

(111) IPCC (2008): *Decision Framework for Special Reports, Methodology Reports and Technical Papers (Amended in September 2008)*, Genf: Intergovernmental Panel on Climate Change.

(112) IPCC (2021): *Global Warming of 1.5 °C*, New York, NY: Cambridge University Press.

(113) HULME, M. (2019): „Is It Too Late (To Stop Dangerous Climate Change)? An Editorial“, in: *WIREs Climate Change* 11, e619. <https://doi.org/10.1002/wcc.619>.

(114) PETERS, G.-J.Y., RUITER, R.A.C. & KOK, G. (2013): „Threatening Communication: A Critical Re-Analysis and a Revised Meta-Analytic Test of Fear Appeal Theory“, in: *Health Psychology Review* 7, Suppl. 1, S. 8–31. <https://doi.org/10.1080/17437199.2012.703527>. TANNENBAUM, M.B., ET AL. (2015): „Appealing to Fear: A Meta-Analysis of Fear Appeal Effectiveness and Theories“, in: *Psychological Bulletin* 141, 6, S. 1178–1204. <https://doi.org/10.1037/a0039729>.

(115) CHAPMAN, D.A./LICKEL, B./MARKOWITZ, E.M. (2017): „Reassessing Emotion in Climate Change Communication“, in: *Nature Climate Change* 7, S. 850–852. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-017-0021-9>.

vertrauenswürdige Kanäle auszuwählen und effektive Frames zu wählen. (116) Diese Art von Überlegungen wird entscheidend sein, um einen nützlichen und akkuraten zivilgesellschaftlichen Diskurs zu gewährleisten.

Schlussfolgerungen

Es gibt zahlreiche Hinweise darauf, dass der Klimawandel katastrophale Ausmaße annehmen könnte. Selbst bei einer nur mäßigen Erwärmung könnten wir in solche „Endgames“ geraten. Das Verständnis extremer Risiken ist wichtig für eine solide Entscheidungsfindung, von der Vorbereitung bis zur Erwägung von Notfallmaßnahmen. Dazu müssen nicht nur Szenarien mit höheren Temperaturen untersucht werden, sondern auch inwieweit der Klimawandel mit seinen Auswirkungen zu systemischen Risiken und anderen Kaskaden beiträgt. Wir gehen davon aus, dass es an der Zeit ist, ernsthaft zu prüfen, wie wir unseren Forschungshorizont am besten erweitern können, um diesen Bereich abzudecken. Die vorgeschlagene „Climate-Endgame“-Forschungsagenda ist ein Vorschlag, durch diesen wenig erforschten Bereich zu navigieren. Im Angesicht einer Zukunft des beschleunigten Klimawandels blind zu sein für Worst-Case-Szenarien ist bestenfalls naives Risikomanagement und schlimmstenfalls töricht – mit tödlichen Konsequenzen. (117) ●

(116) COLVIN, R.M., ET AL. (2019): „Learning From the Climate Change Debate to Avoid Polarisation on Negative Emissions“, in: *Environmental Communication* 14, S. 23–35. <https://doi.org/10.1080/17524032.2019.1630463>.

(117) Für diese Arbeit wurden bereits veröffentlichte Daten verwendet. Siehe WORLDCLIM (2020) (wie Anm. 50), INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS (2018) (wie Anm. 51), MEINSHAUSEN ET AL. (2011) (wie Anm. 53), FUND FOR PEACE (2021) (wie Anm. 54). Wir danken Benedikt Knüsel, Mark Lynas, John Broome, Ingo Fetzer, Peter Watson, Florian Ulrich Jehn, Zoe Cremer, Constantin Arnscheidt, Nathaniel Cooke, zwei anonymen Gutachtern und Kerry A. Emanuel (PNAS) für ihre hilfreichen Kommentare. Wir danken Dirk Biermann, Janin Schaffer und Killian Cremer für ihre Unterstützung bei Abb. 3.

