ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Huwe, Vera; Henze, Levi T.; Steitz, Janek

Research Report

16 Gründe für schnelles Handeln: Kipppunkte und ihre Bedeutung für die Klimapolitik

Fachtexte

Provided in Cooperation with:
Dezernat Zukunft - Institute for Macrofinance, Berlin

Suggested Citation: Huwe, Vera; Henze, Levi T.; Steitz, Janek (2023) : 16 Gründe für schnelles Handeln: Kipppunkte und ihre Bedeutung für die Klimapolitik, Fachtexte, Dezernat Zukunft e.V., Berlin

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/277908

Standard-Nutzungsbedingungen:

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

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

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

Terms of use:

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

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

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

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

16 Gründe für schnelles Handeln – Kipppunkte und ihre Bedeutung für die Klimapolitik

@ Vera Huwe, Levi T. Henze, Janek Steitz[1]
Vera.huwe@dezernatzukunft.org

07.06.2023

Executive Summary

Die jüngste klimawissenschaftliche Forschung zeigt, dass Kipppunkte im Erdsystem sehr viel näher sind als lange angenommen. Diese Revision hat weitreichende Folgen. In diesem Hintergrundpapier zeichnen wir den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstand über Kippelemente im Erdsystem knapp nach, diskutieren Wechselwirkungen mit gesellschaftlichen Risiken und leiten grundlegende Implikationen für die deutsche Klimapolitik – und auch unsere eigene Arbeit – ab.

Im Erdsystem sind derzeit 16 biophysikalische Kippelemente identifiziert, die beim Überschreiten eines Schwellenwerts selbstständig in einen qualitativ anderen Zustand übergehen, was zu weitreichenden Auswirkungen auf das Erdsystem führt. Bei 1,5 °C wird erstmals das Kippen mehrerer Kippelemente wahrscheinlich. Oberhalb der Grenze von 1,5 °C steigt das Risiko von Kipppunkten stark an. Aufgrund möglicher Wechselwirkungen zwischen Kippelementen könnte es außerdem zu Kippkaskaden kommen. Da die bisher angekündigten politischen Maßnahmen mit dem Pariser Klimaabkommen nicht konform sind, besteht das Risiko, kritische Schwellenwerte bald zu überschreiten. Um das Risiko von Kippdynamiken zu minimieren, sind deutliche Emissionsminderungen bereits in diesem Jahrzehnt notwendig.

Klimarisiken treffen auf Gesellschaften, die schon vulnerabel sind und die politische Antworten auf die Klimakrise finden müssen. Vulnerabilitäten oder unpassende Lösungsversuche können dazu führen, dass eine gesellschaftliche oder humanitäre Katastrophe eintritt, bevor Kipppunkte im Erdsystem überschritten werden. Auch gesellschaftliche Risiken können sich kaskadenartig entfalten.

Um Emissionen bereits in dieser Dekade schnell zu senken, sollten erstens Maßnahmen künftig unter der Maßgabe der Effektivität ausgewählt werden. Zweitens müssen gesellschaftliche Vulnerabilitäten reduziert und Klimaanpassung ergänzend zu rascher Emissionsminderung gestärkt werden. Drittens sollte Deutschland internationale Klimaschutzkooperationen und Länder mit geringeren finanziellen Möglichkeiten weitreichender unterstützen.

#KIPPPUNKTE
#KLIMAKRISE
#KLIMAPOLITIK

1 Vera Huwe promoviert am Institut für Sozioökonomie der Universität Duisburg-Essen und ist Research Economist mit Schwerpunkt Klimapolitik beim Dezernat Zukunft. E-Mail: vera.huwe@dezernatzukunft.org. Levi T. Henze ist Policy Analyst beim Dezernat Zukunft. E-Mail: levi.henze@dezernatzukunft.org. Janek Steitz ist Direktor beim Dezernat Zukunft. E-Mail: janek.steitz@dezernatzukunft.org.

Wir bedanken uns herzlich bei Tabea Lissner und Raphael Römer für das konstruktive Feedback.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 3
2. Hintergrund: Ein Blick auf historische Klimaveränderungen und die aktuelle Klimakrise 5
3. Kippelemente im Erdsystem 9
4. Gesellschaftliche Risikokaskaden und Kipppunkte 19
5. Implikationen für die Klimapolitik 22
Literaturverzeichnis 25

1. Einleitung

Die Klimakrise ist Realität. Die Auswirkungen der sich beschleunigenden Erderhitzung sind schon heute an vielen Orten deutlich spürbar – verheerend vor allem im Globalen Süden, aber, wie unter anderem die Flut im Ahrtal und der Eifel im Jahr 2021 gezeigt hat, längst auch in Deutschland (Kreienkamp et al. 2021). Eine weitere Eskalation hin zu einer globalen Klimakatastrophe, die Lebensbedingungen an vielen Orten erschwert und Teile der Erde für Menschen unbewohnbar macht, liegt im Bereich des Möglichen. Ob eine Eskalation abgewendet werden kann, hängt vor allem davon ab, wie schnell der globale Treibhausgasausstoß in den kommenden Jahrzehnten auf netto Null reduziert wird, also ob der globale Ausstieg aus allen fossilen Energieträgern gelingt.

Im Zentrum der jüngeren Forschung zu dieser Frage stehen sogenannte Kipppunkte im Erdsystem. Nach einer kritischen Schwelle können selbstverstärkende Feedbackeffekte einen neuen, qualitativ anderen Zustand des Systems hervorrufen. Einige Kipppunkte sind seit Langem bekannt. Der Mechanismus, der etwa dem Kippen der Atlantikzirkulation zugrunde liegt, wurde schon 1961 vom Ozeanforscher Henry Stommel beschrieben. Seit einigen Jahren werden Kipppunkte verstärkt beforscht. In den letzten Jahren gab es große Wissensfortschritte, die aber von der breiten Öffentlichkeit weitgehend unbemerkt geblieben sind. Während immer noch viele Fragen, insbesondere über die Interaktion zwischen verschiedenen Kippelementen ungeklärt sind, ist ein wichtiger Punkt gesichert: Die jüngste Forschung hat das Niveau der globalen Erhitzung, bei der Kipppunkte wahrscheinlich ausgelöst werden, deutlich nach unten revidiert.

Kipppunkte sind viel früher zu erwarten als lange Zeit angenommen. Die Dramatik dieser Revision kann nicht überschätzt werden. Bis vor Kurzem gingen viele davon aus, dass die Wahrscheinlichkeit von Kipppunkten gering und höchstens Ende des Jahrhunderts relevant werden würde (Paterson 2021). Heute wird angenommen, dass bereits 1,5 °C Erhitzung die Schwelle markiert, bei der das Überschreiten mehrerer Kipppunkte wahrscheinlich wird (Armstrong McKay et al. 2022). Ohne ein deutliches Umsteuern wird die 1,5 °C-Schwelle wahrscheinlich erstmals in den frühen 2030er-Jahren erreicht. Darüber hinaus sind verschiedene Kippelemente durch komplexe Stoffflüsse miteinander verbunden, sodass das Überschreiten eines Kipppunkts Kaskadeneffekte auf andere Kippelemente auslösen kann. Infolge dieser Wechselwirkungen schätzen Klimawissenschaftler:innen den derzeitigen Zustand des Erdsystems als eine planetare Notlage ein (Lenton et al. 2019).

Diese neuen Entwicklungen in der Forschung sind mit weitreichenden Folgen für die Klimapolitik verbunden und unterstreichen die dringende Notwendigkeit, die aktuell weiterhin steigenden Treibhausgasemissionen zügig auf null zu senken. Deshalb wollen wir in diesem Papier den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über Kipppunkte nachzeichnen und darauf aufbauend drei grundlegende Implikationen für die deutsche Klimapolitik ableiten.

Die Struktur des Papiers ist wie folgt: Im zweiten Kapitel beschreiben wir die Entwicklungen der aktuellen Klimakrise und skizzieren, was wir über die Effekte von historischen Klimaveränderungen auf Gesellschaften wissen. Im dritten Kapitel fassen wir dann den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstand über Kippelemente im Erdsystem zusammen. Dabei stützen wir uns in erster Linie auf eine kürzlich erschienene Studie im renommierten Journal *Science*, die den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über Kippelemente und deren wahrscheinliche Kipppunkte konsolidiert (Armstrong McKay et al. 2022), ergänzt um einige wenige einschlägige Artikel.[2] Im vierten Kapitel zeigen wir, dass Risiken nicht nur aus Klimaextremen und der Erhitzung, sondern aus deren Interaktion mit gesellschaftlichen Vulnerabilitäten und Lösungsversuchen erwachsen. Im fünften Kapitel skizzieren wir abschließend knapp Implikationen für die Klimapolitik Deutschlands.

2 Kürzlich ist eine weitere wissenschaftliche Metastudie erschienen, die die Kernergebnisse bestätigt und um einige spezifischen Details erweitert (Wang et al. 2023). Ein gut verständlicher Überblick über die Forschung zu Kipppunkten wird außerdem von der OECD (2022) bereitgestellt.

2. Hintergrund: Ein Blick auf historische Klimaveränderungen und die aktuelle Klimakrise

Die menschliche Zivilisation wie wir sie kennen hat sich in einer seit etwa 12.000 Jahren anhaltenden Warmzeit, dem Holozän, entwickelt. Diese Warmzeit löste die bisher letzte Eiszeit ab. Das Holozän ist durch ein außerordentlich stabiles Klima gekennzeichnet: In den vergangenen 12.000 Jahren schwankte die globale Durchschnittstemperatur nie um mehr als ± 1 °C um die globale Durchschnittstemperatur des Zeitraums von etwa 1850 bis 1900, der als Vergleichswert für die vorindustrielle Zeit dient und als Nullpunkt für die Messung der aktuellen Erhitzung fungiert.

Aktuellen Schätzungen zufolge lag im Jahr 2021 die globale Durchschnittstemperatur um etwa 1,2 °C über der Durchschnittstemperatur des vorindustriellen Zeitalters (Rohde 2022). Das Jahr 2021 reiht sich damit in die Rekordwerte der gemessenen mittleren Oberflächentemperatur ein. Die letzten sieben Jahre waren die heißesten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen. Das enge klimatische Fenster des Holozäns haben wir mit der derzeitigen Erhitzung von 1,2 °C bereits verlassen. Das bedeutet, dass sich das Erdsystem auf einen Zustand zubewegt, der von allen Klimazuständen, in denen menschliche Zivilisation existierte und sich Landwirtschaft und komplexe Siedlungs- und Handelsstrukturen entwickelten, abweicht.

Wie Abbildung 1 zeigt, gab es in den vergangenen 50 Millionen Jahren mit wenigen Ausnahmen einen generellen Trend der langsamen Abkühlung. Ebenso ist die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre gesunken. Die wärmste Zeit innerhalb des Holozäns war eine Periode vor etwa 6.500 Jahren, in dem die Temperatur 0,7 °C über den Durchschnittswerten des 19. Jahrhunderts lag (Kaufman et al. 2020). Noch wärmere Temperaturen werden zuletzt für die Zeit zwischen der letzten und der vorletzten Eiszeit vor 125.000 Jahren ausgemacht (IPCC 2021). Eine globale Durchschnittstemperatur, die mehr als 2,5 °C über dem vorindustriellen Niveau liegt, wurde seit mehr als drei Millionen Jahren nicht mehr erreicht.

Je stärker die globale Durchschnittstemperatur ansteigt, desto weiter zurück muss man in der Erdgeschichte blicken, um annähernd vergleichbare Klimazustände zu finden (Burke et al. 2018). Das Erdsystem könnte schon bald einen Zustand erreichen, der sich von allen Klimazuständen unterscheidet, die seit Beginn der Agrargesellschaften vor 7.000 Jahren und darüber hinaus existierten. Für die Szenarien, die eine ungünstige Entwicklung und einen weiteren lang anhaltenden Anstieg der Emissionen modellieren, gibt es in Bezug auf die globale Temperatur am Ende dieses Jahrhunderts *keinen* historischen Präzedenzfall aus der Zeit, in der menschliche Gesellschaften existierten.

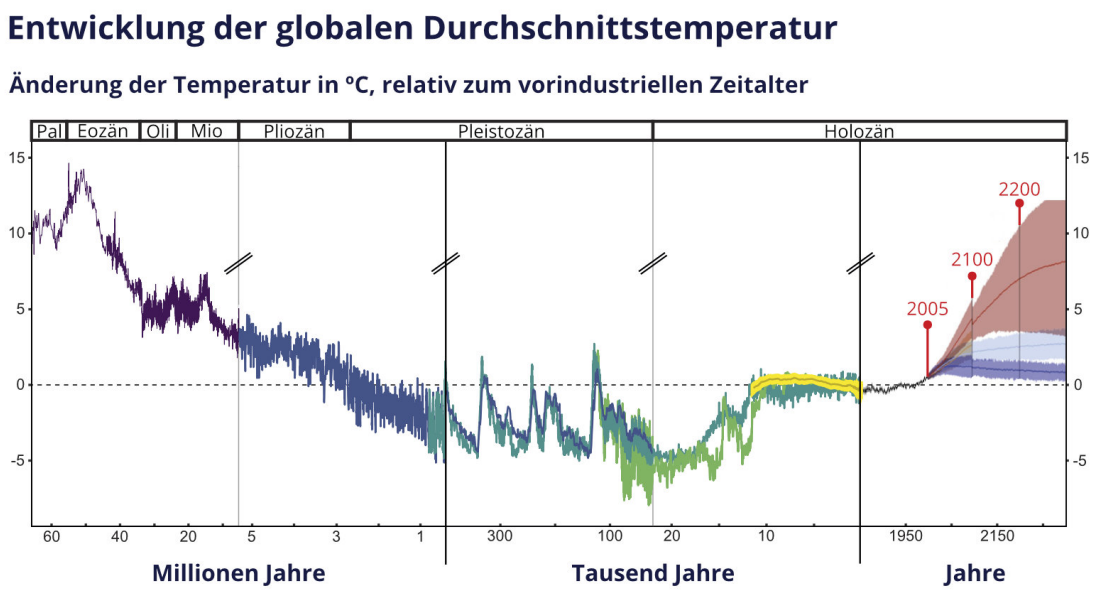


Abbildung 1: Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur; **Quelle:** adaptiert von Burke et al. (2018)

Bedenklich ist nicht nur das Niveau der globalen Erhitzung, sondern auch die *Änderungsrate*. In allen modellierten Szenarien liegt die Geschwindigkeit der Erhitzung am oberen Ende dessen, was jemals in der Erdgeschichte beobachtet wurde. In beiden zurückliegenden Epochen, die der höheren globalen Temperatur am nächsten kommen, erwärmte sich die Erde über einen Zeitraum von mehreren Jahrtausenden. Bereits die in der Vergangenheit gemessenen Änderungsraten haben die Anpassungsfähigkeit von Gesellschaften überstrapaziert (Brovkin et al. 2021). Der 50 Millionen Jahre lang andauernde Abkühlungstrend wird in wenigen Jahrzehnten umgekehrt – eine Geschwindigkeit, die gesellschaftliche Anpassungskapazitäten herausfordern, möglicherweise überfordern könnte.

Auch bei Trendumkehr sind extreme Klimawirkungen möglich

Auch bei einer radikalen Trendumkehr in der Klimapolitik ist die Temperaturgrenze des Pariser Klimaabkommens von 1,5 °C nur schwer einzuhalten, aber aktuell noch im Bereich des Möglichen. Unter Berücksichtigung der Beschlüsse der diesjährigen UN-Klimakonferenz COP27 wird geschätzt, dass die bisherigen Politikmaßnahmen auf eine globale Erhitzung von etwa 2,6 °C bis 2,7 °C bis zum Jahr 2100 hinauslaufen (Unsicherheitsspanne 2 °C bis 3,6 °C) (Carbon Brief 2021). Worst-Case-Szenarien mit einer Erderwärmung von 5 °C oder mehr sind über die letzten Jahre unwahrscheinlicher geworden, doch auch bei Umsetzung aller derzeit angekündigten Maßnahmen ist eine extreme Erderhitzung noch möglich: Die vollständige Umsetzung aller aktuell im Rahmen des Pariser Klimaabkommens festgelegten nationalen Beiträge (NDCs) würde die Erhitzung schätzungsweise auf 2,4 °C (Unsicherheitsspanne 1,8 °C bis 3,3 °C) absenken (ebd.). Eine Erhöhung des Ambitionsniveaus noch in dieser Dekade im Rahmen der bis 2025 zu erneuernden NDCs ist also unerlässlich, um 1,5 °C weiterhin in Reichweite zu halten. Bisher ist jedoch in der tatsächlichen Emissionsminderung keine Trendumkehr herbeigeführt worden. Die Dekarbonisierung kommt nicht nur zu langsam voran, wir laufen global gesehen sogar *in die falsche Richtung*. Nach einem leichten Rückgang während der Coronapandemie sind die weltweiten Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger im Jahr 2022 auf eine neue Rekordhöhe

angestiegen (WMO 2022). Damit setzt sich der generelle Wachstumstrend fort: Global sind die Emissionen im letzten Jahrzehnt vor der Pandemie kontinuierlich angestiegen, insgesamt sowie in allen Sektoren (IPCC 2021). In Deutschland sind die Emissionen sogar trotz geringerer Energienachfrage im Jahr 2022 nicht gesunken (Agora Energiewende 2023).

Wenn die benötigte Trendumkehr nicht in dieser Dekade um 2025 erfolgt, ist das Reißen der 1,5 °C-Grenze in den frühen 2030er-Jahren beinahe unausweichlich (IPCC 2022a). Damit wird nicht nur die Temperaturgrenze des Pariser Klimaabkommens überschritten, sondern wir nähern uns auch gefährlichen Kipppunkten.[3]

Trotz der massiven Risiken und der Möglichkeit einer globalen Klimakatastrophe sind die Extrema der Risikoverteilung bisher kaum erforscht (Kemp et al. 2022). Szenarien, die eine globale Erhitzung von 3 °C oder mehr modellieren, sind relativ zu ihrer Wahrscheinlichkeit unterrepräsentiert, so auch im IPCC-Bericht. Klimamodelle bilden die bekannten Feedbackmechanismen und den aktuellen Wissensstand zu Kipppunkten bisher noch nicht adäquat ab (MacDougall 2021). Zusätzlich gibt es weitere mögliche Feedbackmechanismen, über deren Ausmaß und Gehalt wir weiterhin kaum etwas wissen. Auch ökonomische Modelle, die oft zur Abschätzung der Kosten herangezogen werden, bilden Kippdynamiken bisher nicht korrekt ab, was zu einer fundamentalen Unterschätzung der Risiken führt (Dietz et al. 2021a, 2021b). Für eine robuste Risikoanalyse ist ein verbessertes Verständnis von Bad-to-Worst-Case-Szenarien, inklusive extremer Erhitzung über 3 °C , dringend notwendig (Kemp et al. 2022).

Klimaveränderungen können Gesellschaften destabilisieren

Während das Klima global betrachtet im Holozän außerordentlich stabil war, sind auf regionaler Ebene eine Reihe von abrupten Veränderungen, die sich kaskadenartig durch ökologische und soziale Systeme entfaltet haben, nachweisbar (Brovkin et al. 2021).

In der Vergangenheit sind Klimaveränderungen sowohl im Zusammenhang mit umfassendem Artensterben als auch mit der Destabilisierung von Gesellschaften aufgetreten. Die Kausalität lässt sich für komplexe, weit zurückliegende Entwicklungen jedoch nur schwer nachweisen. Die Messung der Kausalität zwischen ökologischen und sozialen Systemen ist herausfordernd, da die Entwicklung von Gesellschaften durch menschliche Organisation und Umwelteinflüsse ko-konstituiert wird (Arponen et al. 2019; Brovkin et al. 2021). Die Vorhersagekraft vergangener Zusammenbrüche für die Zukunft ist auch aufgrund unterschiedlicher Zeithorizonte und Klimawirkungen begrenzt. Dennoch können konsistente geologische Aufzeichnungen, unterstützt durch Modellierungen, das Verständnis der möglichen Zusammenhänge erhöhen.

Für alle großen Artensterben der Geschichte kann ein Zusammenhang mit Klimaveränderungen nachgewiesen werden. In der Erdgeschichte hat es fünf Massensterben der Arten gegeben, bei denen ein großer Teil aller Arten in verhältnismäßig kurzer Zeit ausstarb. Ein Massensterben wird typischerweise definiert als der Verlust von mindestens 75 % der Arten in weniger als zwei Millionen Jahren. Während der Verlust von Arten regelmäßig vorkommt, sind bei einem Massensterben Umfang und Geschwindigkeit des Artensterbens deutlich größer als üblicherweise.

3 Wenn die in einem einzelnen Jahr gemessene Temperatur über 1,5 °C liegt, ist damit die Temperaturgrenze des Pariser Klimaabkommens noch nicht gebrochen. Da die globale Durchschnittstemperatur von Jahr zu Jahr natürliche Schwankungen aufweist, bezieht sich die Temperaturgrenze auf den Mittelwert eines längeren Zeitraums von mindestens 20 Jahren. Das impliziert auch, dass ein Überschreiten erst im Nachhinein sicher festgestellt werden kann.

Die großen Massensterben der Erdgeschichte können mit einer globalen Erhitzung (oder Abkühlung) von etwa 5,2 °C in Verbindung gebracht werden (Song et al. 2021). Das erneute Erreichen dieser Temperaturschwelle würde wahrscheinlich zu einem mit den historischen Massensterben vergleichbaren Effekt führen (ebd.).

Darüber hinaus deuten einige Fallstudien an, dass Klimaveränderungen als einer von mehreren Faktoren mit der Transformation oder Destabilisierung von Agrargesellschaften in Verbindung gebracht werden können (Kohler & Rockman 2020). In einigen weiteren Fällen gelang die Anpassung an Klimaveränderungen, in anderen Fällen wurde die Anpassungskapazität überschritten und die Gesellschaft brach zusammen. Zum Beispiel traten der Zusammenbruch des Khmer-Imperiums, der Hohokam-Kultur und der Ming-Dynastie in Verbindung mit langen regionalen Dürren auf. Jedoch hatten alle drei Gesellschaften zu früheren Zeitpunkten ähnliche hydroklimatische Schwankungen überstanden. Die Klimaveränderungen haben erst im Zusammenspiel mit sozialen Vulnerabilitäten und den daraus resultierenden gesellschaftlichen Dynamiken zum Zusammenbruch geführt (Brovkin et al. 2021).

Auch basierend auf Evidenz aus dem 20. Jahrhundert lässt sich die Anpassungsfähigkeit menschlicher Gesellschaften in Zweifel ziehen. Die menschliche Leistungsfähigkeit kann nicht nur von schnellen Veränderungen beeinträchtigt werden, sondern hängt neben vielen anderer Faktoren auch grundlegend vom Temperaturmittel ab. Das zeigen Studien schon seit Längerem im Verhalten von Menschen und in Bezug auf die Aktivitäten einzelner Wirtschaftssektoren. Ob das für die Gesamtwirtschaft zutrifft, ist hingegen seit Langem umstritten. Schätzungen beruhen meistens auf Vergleichen *zwischen* Ländern, die durch viele andere Effekte beeinflusst sind. Ein neuerer Ansatz zeigt basierend auf Zeitreihendaten, dass sich der Zusammenhang auch auf die Gesamtwirtschaft verallgemeinern lässt: Über einem jährlichen Temperaturmittel von 13 °C nimmt die ökonomische Produktivität deutlich ab (Burke et al. 2015). Die Analyse lässt den Schluss zu, dass sich auch wohlhabende, industrialisierte Gesellschaften historisch nicht an wärmere Temperaturen angepasst haben.

In den Schätzungen zu ökonomischen Klimafolgekosten gehört der Ansatz von Burke et al. (2015) zwar zum oberen Ende und ist nicht unumstritten. Insgesamt steckt die Forschung zu den Grenzen der Anpassung allerdings noch im Anfangsstadium. Im Zentrum steht dabei die Frage, inwiefern es auch heute noch eine ökologische Nische gibt, die optimale Bedingungen für menschliche Gesellschaften bietet (Xu et al. 2020).

3. Kippelemente im Erdsystem

Wenn auch einzelne Kippmechanismen schon seit den 1980er-Jahren bekannt sind, werden Kippelemente im Erdsystem erst seit kurzer Zeit in ihrer Gesamtheit beforscht. Aufbauend auf frühen Arbeiten identifizierte eine erste systematische Studie aus dem Jahr 2008 neun Elemente im Erdsystem, die einen Kipppunkt überschreiten könnten (Lenton et al. 2008). In den vergangenen Jahren hat sich das wissenschaftliche Verständnis von Kipppunkten im Erdsystem deutlich verbessert. Neue Beobachtungen sind gesammelt worden, Klimamodelle sind präziser geworden. Neue Kippelemente wurden identifiziert und einige andere hinterfragt. Die neue Metastudie von Armstrong McKay et al. (2022) stellt somit eine wichtige, lang erwartete Aktualisierung des Wissens zu Kippelementen dar. Dafür haben die Autor:innen über 200 Publikationen, die seit 2008 veröffentlicht wurden, auf Belege für Kippelemente und deren Schwellenwerte, Zeithorizonte und Auswirkungen ausgewertet.

Definition und Übersicht bekannter Kipppunkte

Für eine Definition von Kipppunkten im Erdsystem sind drei Elemente wesentlich: Ein Kipppunkt tritt auf, wenn eine Veränderung in einem biophysikalischen Teilsystem (a) ab einem bestimmten Schwellenwert auftritt, (b) selbsterhaltend wirkt, was (c) zu weitreichenden Auswirkungen auf das Erdsystem führt (Armstrong McKay et al. 2022). Wird der Kipppunkt überschritten, geht das System von selbst in einen anderen Zustand über. Die Elemente des Erdsystems, die einen Kipppunkt aufweisen, nennt man Kippelemente. Es ist möglich, nach dieser Definition jedoch für einen Kipppunkt nicht notwendig, dass die Änderung abrupt eintritt und/oder nicht mehr rückgängig gemacht werden kann.

Der Schwellenwert impliziert die Nicht-Linearität von Klimaveränderungen. Wenn auch die Veränderungen eine ganze Weile nicht spürbar sein mögen, so ändert sich mit dem Überschreiten der Schwelle der Zustand oder die Entwicklung eines Systems qualitativ. Das heißt, dass Klimaveränderungen nicht proportional zur Erhitzung ablaufen, sondern sich sprunghaft entfalten können. In seinem Blog veranschaulicht Hauptautor Armstrong McKay (2022) diese Kippdynamik mit einer Wippe, über die eine Kugel rollt. Zunächst rollt die Kugel langsam auf die Mitte zu und die Wippe bleibt unverändert liegen, doch wird der Kipppunkt überschritten, kippt die Wippe unaufhaltsam auf die andere Seite.

Selbsterhaltung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich eine Veränderung verselbstständigt und nicht mehr aufzuhalten ist. So führt dann zum Beispiel eine Veränderung in A zu einer Veränderung in B, die wiederum die Veränderungen in A verstärkt und so weiter. Im Bild der Kugel auf der Wippe muss die Kugel nicht über die Wippe geschoben werden. Ab dem Punkt, ab dem die Wippe kippt, beschleunigt sich die Kugel von selbst. Die wichtigste Triebkraft für Selbsterhaltung sind positive Rückkopplungs- oder Feedbackeffekte. In einem System können sowohl positive als auch negative Rückkopplungseffekte vorliegen. Selberhaltung resultiert daraus, dass die positiven Rückkopplungseffekte so stark werden, dass sie die gegenwirkenden, stabilisierenden Effekte überwinden und das System (zumindest temporär) dominieren, bis ein neuer stabiler Zustand erreicht wird. Ein Beispiel für einen Selbsterhaltungsmechanismus bei Eisschilden ist die Rückkopplung zwischen Eisschmelze und Eisschildhöhe, das sogenannte Melt-Elevation-Feedback. Wenn ein Eisschild schmilzt, verliert es an Höhe und kommt dann mit der

tiefer liegenden, wärmeren Umgebungsluft in Kontakt. In der wärmeren Luft schmilzt das Eis dann noch schneller, was wiederum zu zusätzlichem Höhenverlust führt. Der Rückkopplungseffekt mit der Umgebungsluft sorgt dafür, dass das Abschmelzen aus sich heraus erhalten wird und ab einem kritischen Punkt nicht mehr aufgehalten werden kann, auch dann nicht, wenn alle Treibhausgasemissionen sofort eingestellt würden.[4]

Kippelemente sind große biophysikalische Subsysteme, die in ihrem Zusammenspiel das globale Klima regulieren. Es handelt sich um Elemente, deren Größe mindestens subkontinental ist (definiert als eine Größe von mindestens 1 Million km^2) und deren Kippen in diesem Jahrhundert relevant werden könnte. Kipppunkte im Erdsystem können unter anderem zur Beeinträchtigung wichtiger Ökosysteme und zu Biodiversitätsverlust, zum Anstieg des Meeresspiegels sowie einer Verstärkung der Treibhausgasemissionen und Extremwetterereignissen führen.

Gemäß ihren Auswirkungen auf das Erdsystem unterteilen Armstrong McKay et al. (2022) Kippelemente in zwei Kategorien: *globale* Kernkippelemente und Kippelemente mit *regionaler* Wirkung.

Ein *globales* Kernkippelement ist für die allgemeine Funktionsweise des Erdsystems relevant. Ein Kippen würde den aktuellen Zustand des Erdsystems wesentlich beeinflussen. Der Feedbackmechanismus kann vollständig innerhalb des Kippelements ablaufen. In vielen Fällen jedoch folgt aus der Kippdynamik ein zusätzlicher Beitrag zur globalen Erhitzung oder eine Veränderung von Wärme-, Wasser- oder Salzflüssen im Erdsystem. Besteht ein Feedback zur globalen Erhitzung, wird die Auswirkung als wesentlich definiert, wenn das Kippen die globale Erhitzung um mindestens 0,1 °C Grad erhöht. Zu den globalen Kippelementen gehören unter anderem der Zusammenbruch der Eisschilde in Grönland und der Westantarktis, des Permafrosts und der Zirkulationssysteme (Atlantikzirkulation und Konvektion in der Labrador- und Irmingersee) sowie das Absterben des Amazonas.

Kippelemente mit *regionalen* Auswirkungen betreffen das Wohlergehen von mindestens 100 Millionen Menschen oder weisen als einzigartiges Merkmal des Erdsystems einen intrinsischen Wert auf. Regionale Auswirkungen können beispielsweise zu lokalen Temperatursteigerungen, Extremwettern oder Dürreperioden führen. Zu den Kippelementen mit regionaler Wirkung zählen unter anderem das Absterben der Korallenriffe und der Zusammenbruch des westafrikanischen Monsuns.

Kippelemente sind damit in drei Teilsystemen der Erde zu finden: (1) in der Kryosphäre, (2) in den Zirkulationssystemen der Ozeane und der Atmosphäre und (3) in der Biosphäre.[5] Während die erste Metastudie von (Lenton et al. 2008) noch neun Kippelementen identifizierte, geht man heute von 16 Kippelementen aus, wovon neun als global und sieben als regional klassifiziert werden. Die regionale Verteilung wird in Abbildung 2 dargestellt.

4 Theoretisch ist auch nach Überschreiten noch ein Aufhalten und Umkehren des Kippens möglich (Ritchie et al. 2021). Doch in der Praxis scheint dies sehr unwahrscheinlich. Um den Effekt des positiven Rückkopplungsmechanismus zu überschreiben, wäre eine sehr schnelle Abkühlung der Atmosphäre durch die Entnahme von großen Mengen CO_2 erforderlich. Da die Umsetzung großflächiger CO_2-Entnahmen äußerst ungewiss ist (Grant et al. 2021), vernachlässigen wir die theoretische Möglichkeit des kurzzeitigen sicheren Übertretens (safe overshoot). Entsprechend sind in dieser Ausarbeitung die Formulierungen zur Unaufhaltsamkeit von Kippdynamiken zu verstehen.

5 Die Kryosphäre umfasst die Vorkommen von Eis auf der Erde. Dazu zählen die Schnee- und Eisregionen in hohen Breitengraden, Permafrostböden, Gletscher, Eiskristalle in Wolken sowie Schnee- und Eisdecken. Zur Biosphäre gehören alle Bereiche der Erde, die von Lebewesen bewohnt sind.

Kippelemente im Erdsystem

Dezernat Zukunft
Institut für Makrofinanzen

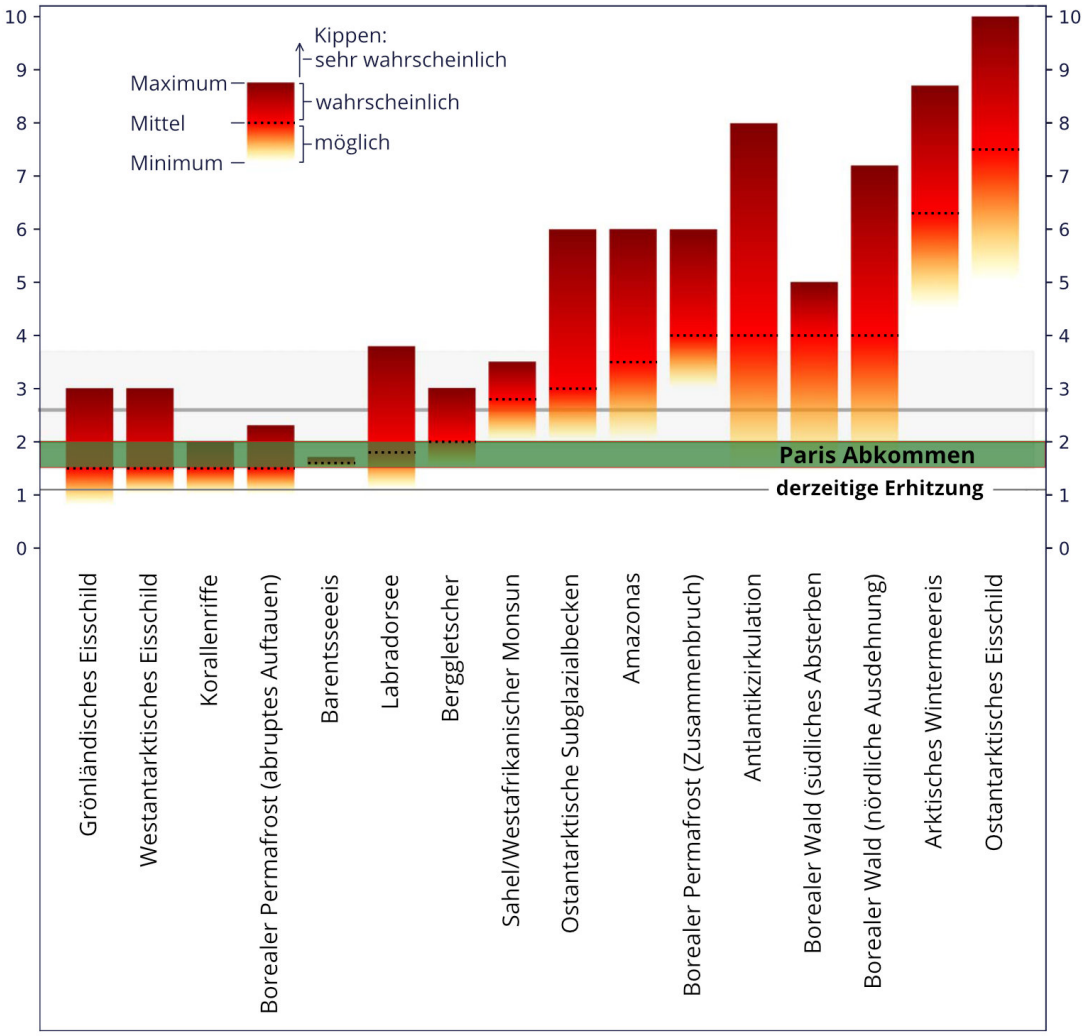
Abbildung 2: Kippelemente im Erdsystem; **Quelle:** adaptiert von Armstrong McKay et al. (2022)

Für jedes Kippelement können Schwellenwerte in der globalen Erhitzung geschätzt werden, bei dessen Überschreiten der Kipppunkt eintritt. Da die Schwellenwerte nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden können, wird aus allen in der Metastudie zusammengeführten Studien durch Expert:innen ein „bester" Schätzwert der globalen Durchschnittstemperatur ermittelt, die das Kippen *wahrscheinlich* auslösen wird.[6] Außerdem wird ein Konfidenzintervall bestimmt, das die Unsicherheit der Schätzung abbildet. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls gibt an, ab welchem Temperaturanstieg das Überschreiten des Kipppunkts bereits *möglich* ist. Abbildung 3 visualisiert den Zusammenhang zwischen globaler Erhitzung und den wahrscheinlichen Kipppunkten.

6 Angelehnt an den allgemeinen Sprachgebrauch ist hier und im Folgenden eine Eintrittswahrscheinlichkeit von über 50 % gemeint, wenn von „wahrscheinlich" die Rede ist. Der IPCC definiert Ereignisse hingegen erst mit 66 % als wahrscheinlich. In der Kipppunkteforschung muss allerdings auch beachtet werden, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung oft unbekannt ist und deshalb keine quantitative Definition möglich ist.

Kipppunkte im Temperaturverlauf

Globale Erhitzung in °C, relativ zum vorindustriellen Zeitalter



Dezernat Zukunft
Institut für Makrofinanzen

Abbildung 3: Kipppunkte im Temperaturverlauf; **Quelle:** adaptiert von Armstrong McKay et al. (2022)

Im Folgenden klassifizieren wir die Kippelemente basierend auf ihrem wahrscheinlichen Kipppunkt in drei Cluster: Die ersten sechs Kipppunkte werden schon im Temperaturkorridor des Pariser Klimaabkommens wahrscheinlich, die ersten vier bereits an dessen unterer Grenze von 1,5 °C. Sechs Kipppunkte liegen zwischen 2 °C und 4 °C und somit im Bereich des aktuellen Pfads. Vier weitere Kippelemente werden wahrscheinlich bei einer noch höheren Erhitzung erreicht. Basierend auf Armstrong McKay et al. (2022) beschreiben wir kurz alle Kippelemente, die im Temperaturkorridor des Pariser Klimaabkommens liegen und als Erstes zu überschritten werden drohen, sowie einzelne Kippelemente, die zwar erst bei einem noch höheren Niveau globaler Erhitzung erreicht werden, die aber besonders relevant für ein umfassendes Verständnis der Auswirkungen erscheinen. Wir berücksichtigen den wahrscheinlichen Kipppunkt, stellen die Kippdynamik (vereinfacht) dar, und geben Zeithorizonte und, falls vorhanden, Rückkopplungseffekte auf die globale Erhitzung an. Um die Kippdynamiken zu illustrieren, ziehen wir ergänzend weitere Quellen heran. Eine ausführlichere Beschreibung und Illustration der Mechanismen kann Wang et al. (2023) entnommen werden.

Zwischen 1,5 °C und bis zu 2 °C globaler Erhitzung wird das Kippen folgender Kippelemente wahrscheinlich (aufsteigend in der Temperatur, bei der der Kipppunkt wahrscheinlich überschritten wird):

- Das **Abschmelzen der großen Eisschilde in Grönland und der Westantarktis**. Der wahrscheinliche Kipppunkt beider Eisschilde liegt bei 1,5 °C Erhitzung. Beim Grönlandeisschild resultiert die Selbsterhaltung aus dem Melt-Elevation-Feedback. Schon heute bringt die Erderhitzung das Grönlandeis zum Schmelzen, Eis rutscht ins Meer. Damit reduziert sich die Höhe des Eisschilds. Das verbleibende Eis trifft auf immer wärmere Luft, wodurch sich das Abschmelzen verstetigt. Steigt die globale Temperatur weiter über den geschätzten Schwellenwert, beschleunigt sich das Abschmelzen unaufhaltsam und führt in der langen Frist (Grönland: 10.000 Jahre; Westantarktis: 2.000 Jahre) zum Totalverlust. Der Zeitraum bis zum vollständigen Abschmelzen verkürzt sich, je stärker der Schwellenwert überschritten wird. In der Westantarktis resultiert die selbsterhaltende Kippdynamik aus dem Zusammenspiel aus Unterspülung und Eisfluss. Die Kontaktlinie des Eisschilds mit dem Meeresboden wird durch Unterspülung stetig zurückgedrängt. Dadurch steigt die Eismasse, die nicht durch Haftreibung festgehalten wird, und der Eisfluss beschleunigt sich.

  Der vollständige Verlust beider Eisschilde würde einen globalen Meeresspiegelanstieg von bis zu 14 Metern festschreiben, der sich langsam, aber unaufhaltsam entfaltet (Bamber et al. 2009; Wang et al. 2023). Andere Kippelemente, insbesondere die für die globalen Temperatur- und Niederschlagsmuster wichtige Atlantikzirkulation, werden durch die Schmelze beeinflusst. Durch die Reduktion der Albedo der Erdoberfläche würde der Kollaps der Eisschilde die globale Erhitzung um 0,13 °C (Grönland) beziehungsweise 0,05 °C (Westantarktis) erhöhen.
- Das **Absterben der Korallenriffe** in niedrigen Breiten: Korallenriffe würden wahrscheinlich ab einer Erhitzung von 1,5 °C innerhalb von zehn Jahren absterben. Mit zunehmender Wassertemperatur bleichen Korallenriffe erst aus und sterben dann ab. Der Feedbackmechanismus resultiert hier aus der Funktion des Ozeans als natürliche Kohlenstoffsenke: In einem versauernden Wasser können die Tiere und Mikroorganismen, die mit den Korallen in Symbiose leben, nicht mehr leben. Der Effekt würde sich nach Überschreiten des Kipppunkts in zehn Jahren vollständig entfalten. Durch den Verlust der Korallenriffe würden die Nahrungskette und der Kohlenstoffkreislauf im Ozean erheblich gestört und indirekt würde die Lebensgrundlage von Millionen Menschen weltweit beeinträchtigt.
- Das **Auftauen des Permafrosts**: Perma- oder Dauerfrostböden sind dauerhaft gefrorene Böden in polaren Gebieten in Sibirien und Nordamerika. Der Permafrost ist ein wichtiger Kohlenstoffspeicher. Im Permafrostboden sind seit der letzten Eiszeit riesige Mengen organischen Materials wie etwa Pflanzenreste eingefroren. Durch den Temperaturanstieg tauen die jahrtausendealten Kohlenstoffspeicher langsam auf, die biologische Aktivität erwacht und der Zersetzungsprozess wird fortgesetzt. Dabei werden Teile des gebundenen Kohlenstoffs als CO_2 und Methan, dessen Klimawirkung noch deutlich stärker ist als die von CO_2, frei. Die eingeschlossenen Mengen Kohlenstoff sind gewaltig: Wissenschaftler:innen schätzen, dass in den Permafrostböden etwa doppelt so viel Kohlenstoff eingeschlossen ist wie derzeit in der Atmosphäre zirkuliert (Tarnocai et al. 2009). In Gebieten mit starkem Bodeneis kann ein selbsterhaltender Rückkopplungseffekt entstehen, wenn sich durch anfängliches Schmelzen Senken in der Bodenoberfläche bilden, die sich dann mit Wasser füllen. Die hohe Wärmekapazität dieser sogenannten Thermokarst-Seen beschleunigt das Auftauen der Frostböden. Während die projizierten Effekte des graduellen Auftauens

uneindeutig und möglicherweise durch die zunehmende Vegetation ausgeglichen werden, würde dieses mögliche Senkenpotenzial durch abruptes Tauen zunichtegemacht und die zusätzlichen Emissionen im Vergleich zum allmählichem Auftauen um 50 % (oder 0,04–0,11 °C pro Grad Erhitzung) erhöht (Turetsky et al. 2020).[7]

- Das **Abschmelzen des Wintermeereises in der Barentssee**: Der wahrscheinliche Kipppunkt des Wintermeereises in der Barentssee liegt bei 1,6 °C. Das Abschmelzen von Wintermeereis in der Barentssee in der Nähe von Skandinavien durch einen verstärkten Zustrom warmen Atlantikwassers beeinträchtigt die Luftzirkulation, das europäische Klima und möglicherweise die Atlantikzirkulation. Das Abschmelzen würde sich über einen Zeitraum von 25 Jahren entfalten.
- Die **Konvektion in der Labrador- und Irmingersee**: Der Kipppunkt der Konvektion in der Labrador- und Irmingersee liegt wahrscheinlich bei 1,8 °C und würde sich innerhalb von zehn Jahren realisieren. Die Labradorsee (zwischen Kanada und Grönland) und die Irmingersee (zwischen Grönland und Island) sind zwei der wenigen Orte, an denen Sauerstoff aus der Atmosphäre in den tiefen Ozean gelangt und sich dort großflächig verteilt. Im Winter verdichtet sich das sauerstoffreiche Oberflächenwasser, sinkt ab und vermischt sich mit tieferem Wasser. Auf diesem Wege belüftet die Konvektion den tiefen Ozean mit Sauerstoff, der sich von dort aus weiterverbreitet. Die Konvektion ist essenziell für Ökosysteme im tiefen Ozean und für die Speicherungskapazitäten des Ozeans für Kohlenstoff und Wärme (Koenigk et al. 2021). Die globale Erhitzung verändert Dichte und Salzgehalt des Ozeans und kann so die Konvektion stören oder gar zum Erliegen bringen. Ein Zusammenbruch der Konvektion würde innerhalb von zehn Jahren abkühlende Klimaeffekte erzeugen (in Nord- und Mitteleuropa bis zu 2 °C bis 3 °C, global 0,5 °C) und gleichzeitig den Jetstream nach Norden verschieben und Wetterextreme in Europa sehr viel wahrscheinlicher machen (Sgubin et al. 2017). Darüber hinaus gehen Wissenschaftler:innen von einem destabilisierenden Effekt auf die Atlantikzirkulation aus, dessen Stärke jedoch umstritten ist.

Bereits die Auswirkungen der Kipppunkte, die im Temperaturkorridor des Pariser Klimaabkommens wahrscheinlich ausgelöst werden, werden massiv sein. Viele der Auswirkungen wie zum Beispiel die Effekte auf Ozeane und Meeresspiegel sind unumkehrbar. Tabelle 1 zeigt die Schwellenwerte, Grenzen und Zeithorizonte für die Kippelemente, die bereits im Paris-Korridor von 1,5 °C bis weniger als 2 °C globaler Erhitzung wahrscheinlich werden.

7 Ein weiterer Kipppunkt des Permafrosts basiert auf einem Komposteffekt, bei dem die biologische Aktivität den Boden weiter aufwärmt. Dieser Effekt setzt wahrscheinlich bei 4 °C Erhitzung ein und würde innerhalb von 50 Jahren zum Kollaps des Permafrosts führen.

Kippelement	Kipppunkt (in °C)		Zeithorizont (in Jahren)		Auswirkungen	
	zentraler Schätzer	Minimum / Maximum	zentraler Schätzer	Minimum / Maximum	global (°C) / regional (°C)	andere
Grönländisches Eisschild (Kollaps)	1,5	0,8 / 3	10.000	1.000 / 15.000	0,13 / 0,05–3,0	Meeresspiegelanstieg (7 m)
Westantarktisches Eisschild (Kollaps)	1,5	1 / 3	2.000	500 / 13.000	0,05 / 1	Meeresspiegelanstieg (5–7 m)
Konvektion der Labrador- und Irmingersee (Kollaps)	1,8	1,1 / 3,8	10	5 / 50	-0,5 / -3	Wetterextreme in Europa, Einfluss auf Atlantikzirkulation
Korallenriffe (Absterben)	1,5	1 / 2	10	– / –	– / –	Verlust an Biodiversität
Permafrost (abruptes Auftauen)	1,5	1 / 2,3	200	100 / 300	zusätzliche Erwärmung bis zu +0,1 °C pro 1 °C	
Wintereis Barentssee (Auftauen)	1,6	1,5 / 1,7	25	– / –	+	Einfluss auf Atlantikzirkulation

Tabelle 1: Kippelemente zwischen 1,5 °C und 2,0 °C. Die Dynamiken, die die zusätzliche Erhitzung durch abruptes Auftauen des Permafrosts beeinflussen, sind komplex, hängen jedoch u. a. indirekt von der maximalen globalen Erhitzung ab.; **Quellen**: Armstrong McKay et al. (2022), Bamber et al. (2009), Wang et al. (2023)

Zwischen 2 °C und 4 °C globale Erhitzung wird gemäß Armstrong McKay et al. (2022) das Kippen folgender Kippelemente wahrscheinlich:

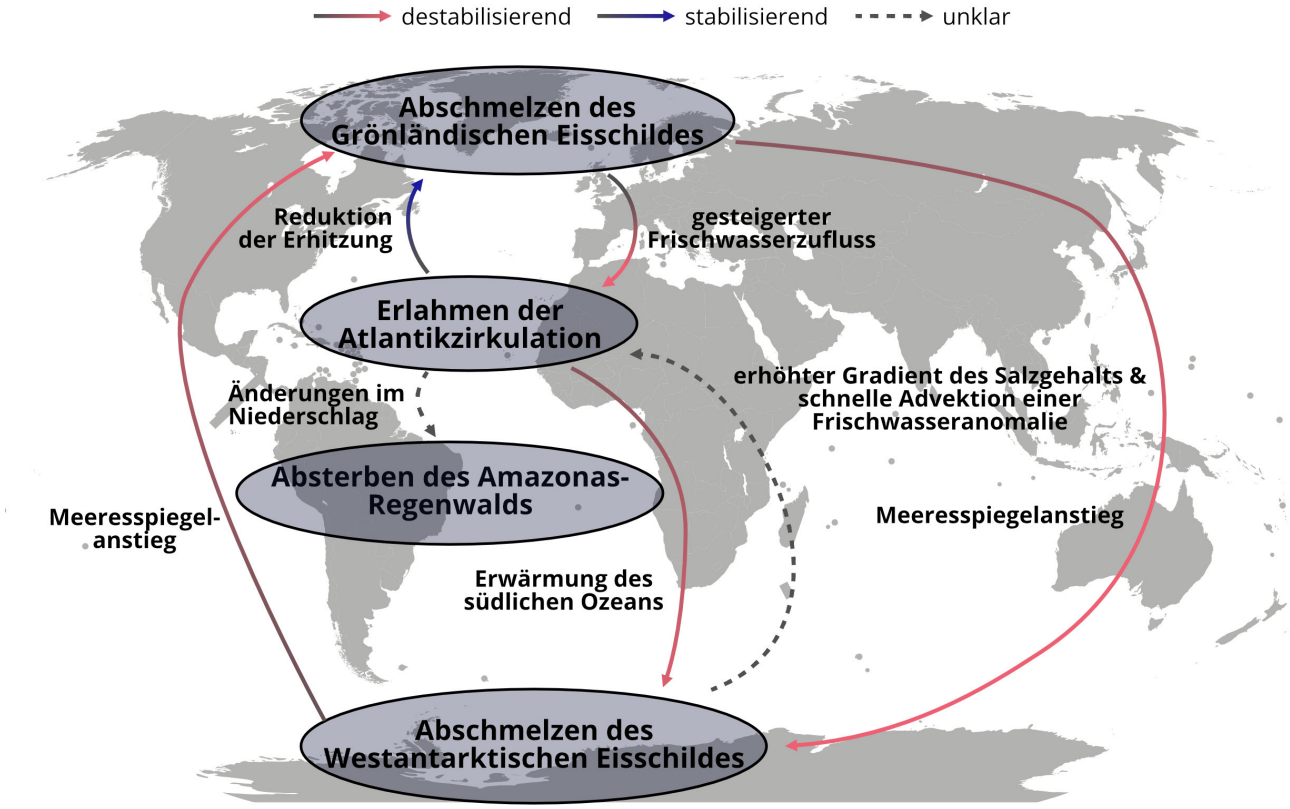
- Abschmelzen der Gletscher,
- westafrikanischer Monsun,
- Zusammenbruch der ostantarktischen subglazialen Becken,
- der vollständige Zusammenbruch des Permafrosts,
- das Absterben des Amazonas-Regenwalds,
- der Zusammenbruch der Atlantikzirkulation.

Bei mindestens 4 °C liegen noch die Kippelemente:

- Veränderungen in den nordischen Nadelwäldern (Absterben im Süden, Expansion im Norden),
- Kollaps des antarktischen Wintermeereseises und des ostantarktischen Eisschilds.

Neue Forschung legt nahe, dass mehrere Kippelemente miteinander verbunden sein könnten. So könnten **Kippkaskaden** entstehen, bei denen das Überschreiten eines Kipppunkts positive Feedbackmechanismen auslöst, die die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens eines anderen Kipppunkts steigern. Globale Kernkippelemente beeinflussen die globale Durchschnittstemperatur und damit per Definition die Wahrscheinlichkeit des Kippens anderer Kipppunkte. Zusätzlich können jedoch die einer Kippdynamik inhärenten Wärme-, Salz-, Wasser-, Kohlenstoffflüsse direkte Interaktionen mit anderen Kippelementen auslösen. Diese könnten stabilisierend oder destabilisierend auf das Erdsystem wirken. Wenn auch die möglichen Interaktionen zwischen Kippelementen bisher nur rudimentär verstanden werden, zeichnet sich innerhalb vereinfachter Modelle mit ausschließlich linear gekoppelten Kippelementen ab, dass Wechselwirkungen zwischen Kippelementen, für die bereits Anzeichen einer Kippdynamik vorliegen, tendenziell destabilisierende Kippkaskaden hervorrufen könnten (Wunderling et al. 2021). Eine mögliche Verkettung von Wechselwirkungen geht vom Grönländischen Eisschild aus, dessen Kippen über einen vermehrten Süßwassereintrag durch Schmelzwasser die Atlantikzirkulation verschieben könnte, was wiederum Dürren im Amazonas verstärkt und das Abschmelzen des Westantarktischen Eisschilds beschleunigen könnte (ebd.). Durch die komplexen Wechselwirkungen der Kippelemente ist das Eisschild am Nordpol mit dem Eisschild am Südpol verbunden. Die grundlegende Dynamik wird in Abbildung 4 dargestellt.

Interaktionen zwischen vier Kippelementen



Dezernat Zukunft
Institut für Makrofinanzen

Abbildung 4: Interaktionen zwischen vier Kippelementen; **Quelle:** adaptiert von Wunderling et al. (2021)

Die Existenz von Kippkaskaden bedeutet *nicht*, dass sich die Erhitzung unkontrollierbar immer weiter beschleunigt. Vielmehr scheint es möglich, dass der Temperaturkorridor zwischen 2 °C und 4 °C instabil sein könnte, dann jedoch ein neuer stabiler Zustand erreicht wird (Steffen et al. 2018). Im Kohlenstoffkreislauf stehen den negativen Feedbackeffekten natürliche Kohlenstoffsenken entgegen, sodass über große Temperaturspannen eine ungefähr lineare Beziehung zwischen kumulativen Emissionen und der langfristigen Erderhitzung besteht. Zwischen 1959 und 2008 verblieben im Durchschnitt 43 % der jährlichen CO_2-Emissionen in der Atmosphäre, der Rest wurde von Landflächen und in den Ozeanen absorbiert (Le Quéré et al. 2009). Anders als die Kippdynamiken, die sich teilweise über sehr lange Zeiträume entfalten, nehmen die Ozeane das CO_2 sehr schnell auf, versauern aber dadurch weiter. Die Effektivität der Senken, also der relative Anteil der CO_2-Emissionen, der aufgenommen werden kann, wird jedoch mit steigenden kumulierten Emissionen mit hoher Sicherheit abnehmen (IPCC 2021), was sich auch bereits in den Daten seit den 1960er-Jahren abzeichnet (Le Quéré et al. 2009). Zwar wird bei höheren kumulativen CO_2-Emissionen absolut mehr CO_2 in Kohlenstoffsenken zu Land und See gespeichert, insgesamt verbleibt jedoch auch mehr CO_2 in der Atmosphäre – was für die weitere Erhitzung und damit auch das Überschreiten weiterer Kipppunkte letztendlich ausschlaggebend ist. Außerdem werden einige Kippelemente nicht nur von der globalen Durchschnittstemperatur beeinflusst, sondern hängen stark von Wechselwirkungen mit anderen Kippelementen oder von regionalen Einflüssen ab (MacDougall 2021).

Zwischenfazit

Auf Basis der in diesem Kapitel diskutierten Forschung lassen sich fünf Kernergebnisse festhalten:

(1) Kipppunkte sind näher als zuvor angenommen.

Die Revision in Bezug auf den früheren Erkenntnisstand ist so drastisch wie dramatisch. Die Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass viele Kipppunkte bei einer viel geringeren Erhitzung als bisher angenommen und damit bereits in naher Zukunft überschritten werden könnten. Für die allermeisten Kippelemente wurde der wahrscheinliche Temperaturschätzer des Kipppunkts nach unten korrigiert, teilweise deutlich. Zum Beispiel wurde für das Grönländische Eisschild zuvor noch der Schwellenwert von 3 °C angenommen (Lenton et al. 2008). Nun gilt das Kippen bereits bei 1,5 °C als wahrscheinlich.

(2) Die ersten fünf Kipppunkte sind möglicherweise schon überschritten.

Bei der aktuellen Erhitzung von 1,2 °C kann für die ersten fünf Kippelemente – der Zusammenbruch des Grönländischen und des Westantarktischen Eisschildes, das Absterben tropischer Korallenriffe, das abrupte Auftauen von Permafrostböden und der Zusammenbruch der Konvenktion der Labrador- und Irmingersee – nicht mehr ausgeschlossen werden, dass unaufhaltbare Kippdynamiken bereits in Gang gesetzt wurden. Wenn auch der Temperaturschwellenwert, bei dem das Kippen auf Basis aller vorliegenden Studien von Expert:innen als *wahrscheinlich* eingeschätzt wird, noch nicht erreicht ist, ist das Kippen bereits *möglich*, selbst mit deutlicher Beschleunigung der Klimapolitik. Das bedeutet, dass selbst wenn die Treibhausgasemissionen bald zurückgehen sollten, extreme Klimaveränderungen aufgrund von Rückkopplungseffekten schon heute nicht mehr ausgeschlossen werden können, insbesondere nicht in der langen Frist.

(3) Kipppunkte werden erstmals bei Überschreiten von 1,5 °C wahrscheinlich und mit steigender Temperatur wahrscheinlicher.

Auch wenn die Auswirkungen der aktuellen Erhitzung bereits schwere Folgen mit sich bringen und entsprechend nicht als sicher bezeichnet werden können, markiert die Erhitzung von 1,5 °C die Schwelle, bei der die Wahrscheinlichkeit von Kipppunkten signifikant wird. Bei 1,5 °C globaler Erhitzung, die bereits in den 2030er-Jahren erreicht werden könnte, verschiebt sich die Einschätzung für vier der ersten fünf Kippelemente von *möglich*, dem niedrigsten aller ermittelten Schwellenwerte, zu *wahrscheinlich*, also dem Schwellenwert, der auf Basis aller Studien von Expert:innen als bester Schätzer eingestuft wird. Das heißt, dass das Reißen von 1,5 °C wahrscheinlich zum Überschreiten mehrerer Kipppunkte im Erdsystem führt, einschließlich der zwei großen Eisschilde, die für die Stabilität des Erdsystems von zentraler Bedeutung sind.

Die Wahrscheinlichkeit weiterer Kipppunkte steigt zwischen 1,5 °C und 2 °C weiter an. Ein Anstieg auf bis zu 2 °C macht zusätzlich den Zusammenbruch der Konvektion der Labrador- und Irmingersee und am oberen Ende auch den Verlust extrapolarer Gletscher wahrscheinlich. Zudem wird das Kippen von fünf weiteren Kippelementen als möglich klassifiziert.

Die im Pariser Klimaabkommen vorgesehene Begrenzung auf „deutlich unter 2 °C" ist somit kein einheitlicher Bereich, vielmehr steigen die Auswirkungen mit steigender Temperatur nach 1,5 °C stark an. Dies bekräftigt die Ergebnisse des Special Report des IPCC (2018), wonach jedes verhinderte Zehntel Grad Erderhitzung einen Unterschied macht. Auch die Wahrscheinlichkeit für mögliche Kippkaskaden, die bisher nur rudimentär verstanden sind, aber nicht ausgeschlossen werden können, würde durch jedes verhinderte Zehntel Grad Erderhitzung vermindert. Das bedeutet, dass die weitere Erhitzung immer noch davon abhängt, wie schnell wir die Emissionen jetzt senken und ob es gelingt, eine radikale Wende in der Effektivität von Klimapolitik zu erwirken.

(4) Die derzeitige Politik ist nicht Paris-konform und birgt deshalb die Gefahr, unkontrollierte Kippkaskaden auszulösen.

Mit der derzeitigen Emissionsentwicklung und den vorgelegten nationalen Beiträgen (NDCs) steuern wir auf eine Erwärmung von deutlich über 2 °C bis 2100 zu. Zwischen 2 °C und 3 °C Erderhitzung wird das Überschreiten von fast allen Kipppunkten möglich und von vielen wahrscheinlich. Kippkaskaden können nicht länger ausgeschlossen werden. Kippkaskaden könnten Versuche der Stabilisierung konterkarieren und den Pfad zu einem „Hothouse Earth" (Steffen et al. 2018) zementieren.

(5) Um das Risiko von Kipppunkten zu minimieren, sind deutliche Emissionsminderungen bereits im nächsten Jahrzehnt notwendig.

1,5 °C markiert die Schwelle, an der mehrere Kipppunkte erstmalig wahrscheinlich werden. Um diese Schwelle möglichst wenig zu überschreiten und das Risiko des Erreichens von Kipppunkten zu minimieren, müssen deutliche Emissionsminderungen in der nächsten Dekade erzielt werden (siehe auch OECD 2022). Die verheerenden Folgen von Kipppunkten oder gar Kippkaskaden sind damit kein Problem der fernen Zukunft, sondern relevant für kurz- und mittelfristige Entscheidungen der Klimapolitik.

4. Gesellschaftliche Risikokaskaden und Kipppunkte

Was bedeuten Klimarisiken für unsere Gesellschaften? Ökologische Systeme und gesellschaftliche Systeme sind eng miteinander verbunden und interagieren auf komplexe, vielfältige Weisen (Brovkin et al. 2021; Franzke et al. 2022). Klimarisiken sind also kein rein biophysikalisches Ereignis, sondern treffen auf Gesellschaften, die schon vulnerabel sind, wenn auch zu unterschiedlichem Grad, und die politische Lösungen für die Krise finden müssen (Kemp et al. 2022). Gesellschaftliche Fragilität kann dazu führen, dass eine gesellschaftliche oder humanitäre Katastrophe eintritt, bevor Kipppunkte im Erdsystem überschritten werden.

Gesellschaftliche Fragilität erwächst zum einen aus schon bestehenden Vulnerabilitäten. Schon vor dem russischen Angriffskrieg in der Ukraine waren steigende Lebensmittelpreise auch maßgeblich von globaler Erhitzung und dürrebedingten Ernteausfällen getrieben. Lieferketten sind durch die Coronapandemie und den Krieg für Störungen anfällig. Die Klimakrise verstärkt diese bestehenden Vulnerabilitäten und erhöht den Druck auf Energie- und Versorgungssysteme. Das Risiko kann systemisch werden; bei weiterer Eskalation der Klimakatastrophe könnte eine kleine Störung in einem Teilsystem ausreichen, um den Ausfall ganzer Systeme zu bewirken.

Neben diesem systemischen Risiko wirkt die Klimakrise auch latent, das heißt, Risiken, die in Zeiten relativer Stabilität gesellschaftlich handhabbar sind, werden in Krisenzeiten unkontrollierbar und überfordern die gesellschaftliche Fähigkeit, sich von anderen Herausforderungen zu erholen. Im Extremfall bedroht das Fortschreiten der Klimakrise also die gesellschaftlichen Kapazitäten, sich von einer anderen Katastrophe, zum Beispiel von einem militärischen Konflikt, zu erholen.

Unpassende oder sozial ungerechte Lösungsversuche

Gesellschaftliche Fragilität erwächst aber auch aus unpassenden oder sozial ungerechten Lösungsversuchen. Nicht jede Klimapolitik ist gute Klimapolitik: Maßnahmen, die die Ursache der Klimakrise nicht effektiv beheben, sondern auf risikobehaftete Lösungen oder Scheinlösungen setzen, vermeiden eine weitere Erderhitzung nicht oder womöglich unzureichend und führen damit zu einem höheren Risiko von weiterer Erderwärmung, Extremwettern und Kippkaskaden. Zum Beispiel kann ein übersteigerter Fokus auf Negativemissionstechnologien, deren großflächige Verfügbarkeit technologisch und ökonomisch weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet ist und die sich möglicherweise nicht großflächig materialisieren werden (Grant et al. 2021; Minx et al. 2018), diskursiv genutzt werden, um den Ausbau erneuerbarer Energien zu verschleppen.

Ähnlich wirken Vorschläge, eine Anpassung an eine heißere Welt gegenüber Emissionsminderungsstrategien zu priorisieren. Maßnahmen zur Anpassung an bereits existierende sowie absehbare Klimaveränderungen sollten auch heute schon Priorität haben, da aktuell bereits eine Lücke zwischen Anpassungsbedarf und der tatsächlichen Umsetzung besteht. Doch sie können das Senken der Emissionen nicht ersetzen. Im schlimmsten Fall führt ein übersteigerter Fokus auf Anpassungsmaßnahmen zu unzureichenden Vermeidungsmaßnahmen, was wiederum zu weiterer Erderwärmung führt, deren Folgen die Anpassungskapazitäten der Menschheit oder einzelner Bevölkerungsgruppen letztlich überschreiten könnte. Wenn mit der Zeit die Auswirkungen der Klimakrise noch stärker werden, ist es denkbar, dass sich der Schwerpunkt der Politik sowie finanzielle Ressourcen von Ursachenbehebung auf die Bewältigung der Folgen verschieben und so in einer Abwärtsspirale die kollektive Anpassungsfähigkeit untergraben (IPPR 2023). Wie im zweiten Kapitel diskutiert, sind außerdem erhebliche Zweifel daran berechtigt, in welchem Maße ein Anpassen grundsätzlich möglich ist (Burke et al. 2015). Sowohl weiche als auch einige harte Anpassungsgrenzen sind bereits erreicht (IPCC 2022b).

Auch eine rein auf Emissionsminderung zentrierte Klimapolitik birgt gesellschaftliche Risiken und wirkt möglicherweise negativ auf den Verlauf der Klimakrise. Ökonomische Implikationen der Transformation sowie Unsicherheiten und Sorgen um ungleiche Transformationsauswirkungen können die Mobilisierung breiter Bevölkerungsgruppen, die notwendig wäre, um Maßnahmen mit hohem Emissionsminderungspotenzial umzusetzen und die klimapolitische Blockade fossiler Konzerne zu überwinden, verhindern (Green & Healy 2022). Wenn auch Klimapolitik nicht per se regressiv ist und die Verteilungswirkungen von Klimapolitik von Auswahl und Ausgestaltung der Maßnahmen abhängt (Lamb et al. 2020), birgt die Transformation ein erhebliches makroökonomisches Risiko (Pisani-Ferry 2021). Die Sorge um diese Risiken kann (und wird bereits heute) von Akteur:innen entlang des politischen Spektrums genutzt, um gegen Klimaschutz zu mobilisieren. Eine Verschärfung der Klimakrise könnte autoritären Lösungsstrategien Aufwind geben und damit zum Beispiel das Leid der Menschen erhöhen, die klimabedingt migrieren müssen. Ein fairer, vorausschauender Umgang mit der Klimakrise sollte deshalb der Verschränkung von Gerechtigkeit, Anpassung und Vermeidung Rechnung tragen.

Risikokaskaden und Kipppunkte

Ähnlich wie bei Kipppunkten im Erdsystem sind auch bei gesellschaftlichen Risiken Risikokaskaden möglich, bei denen eine Risikoquelle die nächste verstärkt (Kemp et al. 2022). Risikokaskaden können ökonomische Krisen, gesellschaftliche Spaltung und Wiedererstarken von rechten Parteien, geopolitische oder gar militärische Konflikte und die Ausbreitung von Krankheiten umfassen.

In einer globalisierten Wirtschaft können lokale Handlungen oder Ströme sich verbreiten und an weit entfernten Orten wirken, oft auf unerwartete Weise (Liu et al. 2013). Beispielsweise können Dürren in Getreideanbaugebieten über die Integration mit dem globalen Lebensmittelmarkt zu einem Anstieg der Lebensmittelpreise in anderen Regionen führen. Sollten die Ernten an mehreren wichtigen Produktionsorten gleichzeitig ausfallen, könnten politische Reaktionen zu geopolitischen Spannungen führen. Dies war zum Beispiel der Fall, als bei einer lang anhaltenden Dürre in Osteuropa 2010 der Export bestimmter Lebensmittel verboten wurde (Dimsdale et al. 2022).

Positive soziale Kipppunkte

Seit den 2000er-Jahren wird in der Forschung zunehmend diskutiert, ob möglicherweise auch soziale Systeme Kipppunkte aufweisen, die den eskalierenden Risiken entgegenwirken können (Winkelmann et al. 2022; Milkoreit et al. 2018). Ähnlich wie bei Kipppunkten im Erdsystem wird davon ausgegangen, dass unter bestimmten Bedingungen eine kleine Änderung in einem sozialen System oder dessen Umgebung durch positive Rückkopplungsmechanismen und Netzwerkeffekte zu einem qualitativ anderen Zustand führen kann (Winkelmann et al. 2022). Wesentlich sind die Existenz mehrerer stabiler Stadien, die Geschwindigkeit der Veränderung und systeminhärente Feedbackmechanismen (Milkoreit et al. 2018). Zwei Annahmen unterscheiden soziale Kipppunkte jedoch ontologisch von Kipppunkten im Erdsystem. Erstens wird unterstellt, dass nicht-lineare Veränderungen für Gesellschaften wünschenswert sind. Wichtiger noch, es wird angenommen, dass soziale Kipppunkte zu einem gewissen Grad bewusst herbeigeführt werden können (Moser & Dilling 2007).

Politikwissenschaftlich werden soziale Bewegungen als Auslöser für solche Dynamiken diskutiert. Soziale Bewegungen beeinflussen die politische Willensbildung und könnten das Überwinden einer kritischen Schwelle katalysieren. Als Beispiele werden unter anderem *Fridays for Future* in

Europa oder globale *Divestment*-Bewegungen angeführt (Winkelmann et al. 2022). Insgesamt ist die empirische Evidenz bisher jedoch gering. Es ist weiterhin möglich, dass Kipppunkte in sozialen Systemen gar nicht oder sehr viel seltener vorkommen als angenommen oder nicht gezielt angesteuert werden können (Milkoreit 2022).

In der ökonomischen und soziologischen Forschung werden funktional äquivalente Phänomene unter dem Begriff der *Pfadabhängigkeit* erforscht, seit einigen Jahren verstärkt auch im Zusammenhang mit Dekarbonisierung (Grubb et al. 2021). Ein theoretisch und empirisch gut etablierter Mechanismus entsteht durch die Kombination von Skaleneffekten und technischem Fortschritt (Acemoglu 2023; Acemoglu et al. 2012). Wegen verschwindend geringer Marktanteile der erneuerbaren Energien und fortbestehender fossiler Subventionen konzentrierte sich in den letzten Jahrzehnten noch viel Forschungsaufwand auf fossile Technologien, trotz der langfristig viel besseren Aussichten emissionsfreier Alternativen. Durch staatliche Förderung verzeichnen erneuerbare Energien nun einen rasanten – wenn auch weiterhin viel zu langsamen – Zuwachs, inzwischen auch oft ganz ohne Förderung (IRENA 2021). Eine ähnliche Dynamik kritischer Schwellen wird auch für die Verbreitung umweltfreundlicher Technologien vermutet, bei denen ein Wandel in der gesellschaftlichen Bereitschaft und technologische Netzwerkeffekte zu nichtlinearen Veränderungen führen könnten (Hoekstra et al. 2017).

5. Implikationen für die Klimapolitik

Was erfordert gute Klimapolitik angesichts der drohenden Katastrophe? Worst-Case-Szenarien können überfordern und lähmen, aber auch zum Handeln anregen (Kemp et al. 2022). Die Tragweite der biophysikalischen Veränderungen, die mit vielfältigen gesellschaftlichen Dynamiken auf unterschiedlichsten Ebenen wechselwirken, ist selbst für ausgewiesene Expert:innen nur schwer zu erfassen. Wenn auch die komplexen Kippprozesse sowie die Wechselwirkungen zwischen biophysikalischen Veränderungen und gesellschaftlichen Dynamiken zweifelsohne dringend stärker beforscht werden sollten, wissen wir heute dennoch bereits genug, um sagen zu können, dass das Verhindern von Kippkaskaden eine radikale Trendwende in der Politik erfordert.

Dafür sind die nächsten zehn Jahre entscheidend. Die Existenz von Kipppunkten bereits zwischen 1,5 °C und 2 °C verdeutlicht, dass selbst das globale Ziel, bis zur Mitte des Jahrhunderts Netto-Nullemissionen zu erreichen, erhebliche Risiken birgt. Soll eine realistische Chance auf die Einhaltung des Pariser Klimaabkommens erhalten bleiben und das Risiko von Kippkaskaden minimiert werden, müssen tiefgreifende Emissionssenkungen bereits in diesem Jahrzehnt wirken.

Wir möchten in diesem Papier keine konkreten klimapolitischen Maßnahmen empfehlen, denn diese leiten sich nicht direkt aus der diskutierten Forschung ab. Doch ergeben sich für uns auf der Basis der Forschung zu biophysikalischen und gesellschaftlichen Kipppunkten drei übergeordnete Leitlinien für die deutsche Politik ebenso wie für unsere eigene Arbeit:

Erstens sollte die Politik – nicht nur Klimapolitik im engeren Sinn – grundsätzlich darauf ausgerichtet sein, Emissionen effektiv zu senken. Um das zu gewährleisten, sollten zweitens gesellschaftliche Vulnerabilitäten reduziert und soziale Voraussetzungen geschaffen werden, die eine schnelle und deutliche Dekarbonisierung ermöglichen. Die Anpassungsfähigkeiten, insbesondere von vulnerablen Ländern, muss dringend gestärkt werden. Und drittens braucht es internationale Kooperationen und eine wirkungsvolle Klimaaußenpolitik, denn letztlich ist allein die Reduktion globaler Treibhausgase entscheidend, um die Erderhitzung zu begrenzen.

Nationale und europäische Politik auf effektiven Klimaschutz ausrichten. Um Emissionen bereits in dieser Dekade schnell zu senken, sollten Maßnahmen künftig unter der Maßgabe der *Effektivität* ausgewählt werden. Kostenüberlegungen sind natürlich zu berücksichtigen, als übergeordnetes Ziel sind sie jedoch überholt (Rosenbloom et al. 2020; Patt & Lilliestam 2018). Zum jetzigen Zeitpunkt lautet die relevante Frage, was tatsächlich wirkt und wie der entsprechende Instrumentenmix so gestaltet werden kann, dass gesellschaftliche Zustimmung gewonnen wird. Ein wichtiger Schritt wäre eine Klima-Governance, die die periodisch notwendigen Emissionsminderungen rechtlich bindend verankert. Um eine schnelle Zielerreichung zu sichern, sollten praktische Umsetzungshürden wie komplizierte Genehmigungsverfahren und Fachkräfteengpässe aus dem Weg geräumt werden. Darüber hinaus sollten auch bisher vernachlässigte Ansätze ernsthaft diskutiert und genutzt werden, etwa Suffizienzstrategien, die großes Minderungspotenzial haben und sich überwiegend positiv auf das Wohlergehen auswirken (Creutzig et al. 2022). Zuletzt hat der russische Angriffskrieg aufgezeigt, wie sehr die Energieversorgung mit komplexen Fragen der Verteilung und politischen Stabilität zusammenhängt. Eine integrierte Betrachtung von Verteilungs- und Klimapolitik ist notwendig und möglich (Rehm et al. 2021).

Gesellschaftliche Vulnerabilitäten reduzieren und Anpassung stärken. Wir haben in der vorliegenden Ausarbeitung gezeigt, dass ökologische Systeme und gesellschaftliche Systeme eng miteinander verbunden sind und auf komplexe und vielfältige Weise interagieren. Die Klimakrise trifft auf Gesellschaften, die bereits vulnerabel sind und politische Lösungen auf die Krise finden müssen. Die Fähigkeit von Gesellschaften, bereits in dieser Dekade deutliche Emissionsminderungen zu realisieren, hängt unter anderem davon ab, wie sich der konkrete Maßnahmenmix zur Umsetzung dieser Minderungen auf die Lebensverhältnisse der Mitglieder der Gesellschaft auswirkt – und auf welche bestehenden Vulnerabilitäten er trifft. Der Ausgabenbedarf zur Überwindung von Lock-in-Emissionen ist für Armutsbetroffene enorm. Kurzfristig muss die Finanzierung dieses Bedarfs sichergestellt und alle Menschen sollten in die Lage versetzt werden, klimabedingte oder anderweitige ökonomische Schocks abzufedern. Das gilt umso mehr, da der individuelle ökologische Fußabdruck nur teilweise eine freie Entscheidung ist und in Teilen durch Investitionsentscheidungen, die vor allem von Vermögenden und dem Staat beeinflusst werden, bedingt wird (Rehm & Chancel 2022). Mittelfristig können gesellschaftliche Vulnerabilitäten durch den Ausbau einer ökologischen öffentlichen Daseinsvorsorge gemindert werden. Das gilt insbesondere auch mit Blick auf den durch veränderte Standortfaktoren und anders verzahnte Wertschöpfungsketten ausgelösten Strukturwandel. Betroffenen Regionen und Bevölkerungsschichten darf die gesellschaftliche Anerkennung und Teilhabe nicht verwehrt bleiben – auch hier bedarf es solider öffentlicher Daseinsvorsorge und auch direkter finanzieller Kompensation.

In den vorangehenden Kapiteln wurde außerdem offensichtlich, dass es Anpassungsmaßnahmen zu stärken gilt – insbesondere in den Teilen der Welt, die von Klimawirkungen bereits heute stark betroffen sind oder es zukünftig sein werden. Selbst bei einer radikalen Trendwende in den globalen Emissionen kann nicht mehr ausgeschlossen werden, dass bei einzelnen Kippelementen wie etwa dem Grönlandischen Eisschild der Kipppunkt bereits ausgelöst wurde oder das Kippen kurz bevorsteht. Gemessen an den historischen Emissionen gehört Deutschland zu den vier größten Verursachern der Klimakrise (Friedlingstein et al. 2022) und auch bei den jährlichen Pro-Kopf-Emissionen liegt es auf Platz 26 (Our World in Data 2022). Wenn auch die Schäden der Klimakrise in Deutschland ökonomisch bereits erheblich sind (Trenzcek et al. 2022), sind diese hierzulande im internationalen Vergleich verhältnismäßig gering (Ricke et al. 2018). Deutschland hat deshalb eine besondere Verantwortung, die Anpassungsfähigkeit von vulnerablen Ländern zu stärken. Die bereits im Rahmen der UN-Klimaschutzkonferenz in Kopenhagen zugesagte Anpassungsfinanzierung von mindestens 50 Mrd. US-Dollar pro Jahr muss dringend erreicht werden, wenngleich dieser Betrag klar hinter dem geschätzten Bedarf zurückfällt. Weitere Instrumente wie ein Loss and Damage Fund (Serdeczny & Lissner 2023) und der Ansatz des Global Shields, der von Deutschland im Rahmen der G7-Präsidentschaft eingebracht wurde und Aktivitäten im Bereich Klimarisikoversicherung und -vermeidung bündelt, sollten gestärkt werden.

Gleichzeitig haben wir im vorherigen Kapitel gezeigt, dass eine Ausweitung von Anpassungsmaßnahmen *keine* Alternative zu rascher Emissionsminderung ist, sondern parallel erfolgen muss. Aus finanzpolitischer Sicht umfassen die Bedarfe der Transformation also nicht nur die Dekarbonisierung, sondern auch die der Anpassung an den Klimawandel innerhalb Europas und die bisher unzureichende internationale Kompensation von Klimaschäden.

Internationale Klimakooperationen und Unterstützung stärken. Die Klimakrise ist ein globales Problem – letztlich kann nur der rasche Rückgang der globalen Emissionen die Erderhitzung begrenzen und das Risiko von Kipppunkten reduzieren. Deshalb ist es entscheidend, dass sich Deutschland für internationale Klimaschutzkooperationen einsetzt und Länder, die weniger finanzielle Möglichkeiten haben, gemeinsam mit anderen wohlhabenden Ländern dabei unterstützt, Maßnahmen zur raschen Emissionsminderung zu finanzieren, umzusetzen und fossile

Pfadabhängigkeiten zu vermeiden. Dies gilt insbesondere für Länder des Globalen Südens mit hohen absoluten Emissionen und hohem Emissionsentwicklungspotenzial, darf aber natürlich nicht auf diese beschränkt sein. Die Initiierung eines offenen und kooperativen Klimaclubs durch die G7-Länder ist deshalb ein richtiger Schritt. Doch finanzielle und wissensbasierte Hilfe kommt trotz mäßiger Erfolge beim jüngsten UN-Klimagipfel immer noch viel zu kurz (Harvey et al. 2022).

Zusammenfassend verdeutlicht die Forschung zu Kipppunkten und gesellschaftlichen Risiken drei zentrale Aspekte der Klimapolitik. Erstens dürfen Kosten und Dekarbonisierung nicht länger gegeneinander ausgespielt werden. Gleiches gilt für Negativemissionstechnologien und Anpassung, die zusätzlich zur Emissionsminderung benötigt werden. Zweitens muss Klimapolitik unbedingt global gedacht werden, mit Blick auf die Vermeidung ebenso wie auf die Folgen. Drittens muss die oberste Maxime bei allen Maßnahmen Effektivität sein – daher müssen die gesamtgesellschaftlichen Folgen und Erfordernisse der Klimakrise unbedingt mitgedacht werden, auch bei der Bewältigung anderer Krisen.

Literaturverzeichnis

Acemoglu, D. (2023): „Distorted Innovation: Does the Market Get the Direction of Technology Right?", National Bureau of Economic Research, w30922 (DOI: 10.3386/w30922), online verfügbar unter: https://www.nber.org/papers/w30922, [Zuletzt aufgerufen: 16.03.2023].

Acemoglu, D. / Aghion, P. / Bursztyn, L. / Hemous, D. (2012): „The Environment and Directed Technical Change", American Economic Review, 102 (1), S. 131–166.

Agora Energiewende (2023): „Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023.", online verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/die-energiewende-in-deutschland-stand-der-dinge-2022/, [Zuletzt aufgerufen: 10.01.2023].

Armstrong McKay, D. I. (2022): „Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points – paper explainer", climatetippingpoints.info, online verfügbar unter: https://climatetippingpoints.info/2022/09/09/climate-tipping-points-reassessment-explainer/, [Zuletzt aufgerufen: 16.5.2023].

Armstrong McKay, D. I. / Staal, A. / Abrams, J. F. / Winkelmann, R. / Sakschewski, B. / Loriani, S. / Fetzer, I. / Cornell, S. E. / Rockström, J. / Lenton, T. M. (2022): „Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points", Science, 377 (6611), eabn7950.

Arponen, V. P. J. / Dörfler, W. / Feeser, I. / Grimm, S. / Groß, D. / Hinz, M. / Knitter, D. / Müller-Scheeßel, N. / Ott, K. / Ribeiro, A. (2019): „Environmental determinism and archaeology. Understanding and evaluating determinism in research design", Archaeological Dialogues, 26 (1), S. 1–9.

Bamber, J. L. / Riva, R. E. M. / Vermeersen, B. L. A. / LeBrocq, A. M. (2009): „Reassessment of the Potential Sea-Level Rise from a Collapse of the West Antarctic Ice Sheet", Science, 324 (5929), S. 901–903.

Brovkin, V. / Brook, E. / Williams, J. W. / Bathiany, S. / Lenton, T. M. / Barton, M. / DeConto, R. M. / Donges, J. F. / Ganopolski, A. / McManus, J. / Praetorius, S. / Vernal, A. de / Abe-Ouchi, A. / Cheng, H. / et al. (2021): „Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system", Nature Geoscience, 14 (8), S. 550–558.

Burke, K. D. / Williams, J. W. / Chandler, M. A. / Haywood, A. M. / Lunt, D. J. / Otto-Bliesner, B. L. (2018): „Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates", Proceedings of the National Academy of Sciences, 115 (52), S. 13288–13293.

Burke, M. / Hsiang, S. M. / Miguel, E. (2015): „Global non-linear effect of temperature on economic production", Nature, 527 (7577), S. 235–239.

Carbon Brief (2021): „Do COP26 promises keep global warming below 2C? ", Carbon Brief, online verfügbar unter: https://www.carbonbrief.org/analysis-do-cop26-promises-keep-global-warming-below-2c/, [Zuletzt aufgerufen: 09.03.2023].

Creutzig, F. / Niamir, L. / Bai, X. / Callaghan, M. / Cullen, J. / Díaz-José, J. / Figueroa, M. / Grubler, A. / Lamb, W. F. / Leip, A. / Masanet, E. / Mata, É. / Mattauch, L. / Minx, J. C. / et al. (2022): „Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of well-being", Nature Climate Change, 12 (1), S. 36–46.

Dietz, S. / Ploeg, F. van der / Rezai, A. / Venmans, F. (2021a): „Are Economists Getting Climate Dynamics Right and Does It Matter?", Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 8 (5), S. 895–921.

Dietz, S. / Rising, J. / Stoerk, T. / Wagner, G. (2021b): „Economic impacts of tipping points in the climate system", Proceedings of the National Academy of Sciences, 118 (34), e2103081118.

Dimsdale, T. / Cecilio, C. / Benomar, I. (2022): „Living on the Edge. How Climate Tipping Points Will Reshape Geopolitics". E3G.

Franzke, C. L. E. / Ciullo, A. / Gilmore, E. A. / Matias, D. M. / Nagabhatla, N. / Orlov, A. / Paterson, S. K. / Scheffran, J. / Sillmann, J. (2022): „Perspectives on tipping points in integrated models of the natural and human Earth system: cascading effects and telecoupling", Environmental Research Letters, 17 (1), 015004.

Friedlingstein, P. / Jones, M. W. / O'Sullivan, M. / Andrew, R. M. / Bakker, D. C. E. / Hauck, J. / Le Quéré, C. / Peters, G. P. / Peters, W. / Pongratz, J. / Sitch, S. / Canadell, J. G. / Ciais, P. / Jackson, R. B. / et al. (2022): „Global Carbon Budget 2021", Earth System Science Data, 14, S. 1917–2005.

Grant, N. / Hawkes, A. / Mittal, S. / Gambhir, A. (2021): „The policy implications of an uncertain carbon dioxide removal potential", Joule, 5 (10), S. 2593–2605.

Green, F. / Healy, N. (2022): „How inequality fuels climate change: The climate case for a Green New Deal", One Earth, 5 (16), S. 635–649.

Grubb, M. / Drummond, P. / Poncia, A. / McDowall, W. / Popp, D. / Samadi, S. / Penasco, C. / Gillingham, K. T. / Smulders, S. / Glachant, M. / Hassall, G. / Mizuno, E. / Rubin, E. S. / Dechezleprêtre, A. / et al. (2021): „Induced innovation in energy technologies and systems: a review of evidence and potential implications for CO 2 mitigation", Environmental Research Letters, 16 (4), 043007.

Harvey, F. / Lakhani, N. / Milman, O. / Morton, A. (2022): „Cop27 agrees historic 'loss and damage' fund for climate impact in developing countries", The Guardian, online verfügbar unter: https://www.theguardian.com/environment/2022/nov/20/cop27-agrees-to-historic-loss-and-damage-fund-to-compensate-developing-countries-for-climate-impacts, [Zuletzt aufgerufen: 15.3.2023].

Hoekstra, A. / Steinbuch, M. / Verbong, G. (2017): „Creating Agent-Based Energy Transition Management Models That Can Uncover Profitable Pathways to Climate Change Mitigation", Complexity, 2017, S. 1–23.

IPCC (2018): „An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty", online verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/sr15/, [Zuletzt aufgerufen: 27.10.2022].

IPCC (2021): „Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 15 I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", online verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/, [Zuletzt aufgerufen: 27.10.2022].

IPCC (2022a): „Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", online verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/, [Zuletzt aufgerufen: 27.10.2022].

IPCC (2022b): „Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability", online verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/, [Zuletzt aufgerufen: 27.10.2022].

IPPR (2023): „1.5°C – dead or alive? The risks to transformational change from reaching and breaching the Paris Agreement goal", online verfügbar unter: https://www.ippr.org/research/publications/1-5c-dead-or-alive, [Zuletzt aufgerufen: 02.03.2023].

IRENA (2021): „Renewable power generation costs in 2021", online verfügbar unter: https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021, [Zuletzt aufgerufen: 16.05.2023].

Kaufman, D. / McKay, N. / Routson, C. / Erb, M. / Dätwyler, C. / Sommer, P. S. / Heiri, O. / Davis, B. (2020): „Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach", Scientific Data, 7 (1), 201.

Kemp, L. / Xu, C. / Depledge, J. / Ebi, K. L. / Gibbins, G. / Kohler, T. A. / Rockström, J. / Scheffer, M. / Schellnhuber, H. J. / Steffen, W. / Lenton, T. M. (2022): „Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios", Proceedings of the National Academy of Sciences, 119 (34), e2108146119.

Koenigk, T. / Fuentes-Franco, R. / Meccia, V. L. / Gutjahr, O. / Jackson, L. C. / New, A. L. / Ortega, P. / Roberts, C. D. / Roberts, M. J. / Arsouze, T. / Iovino, D. / Moine, M.-P. / Sein, D. V. (2021): „Deep mixed ocean volume in the Labrador Sea in HighResMIP models", Climate Dynamics, 57 (7), S. 1895–1918.

Kohler, T. A. / Rockman, M. (2020): „The IPCC: A Primer for Archaeologists", American Antiquity, 85 (4), S. 627–651.

Kreienkamp, F. / Philip, S. Y. / Tradowsky, J. S. (2021): „Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021", World Weather Attribution, online verfügbar unter: https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change/, [Zuletzt aufgerufen: 27.03.2023].

Lamb, W. F. / Antal, M. / Bohnenberger, K. / Brand-Correa, L. I. / Müller-Hansen, F. / Jakob, M. / Minx, J. C. / Raiser, K. / Williams, L. / Sovacool, B. K. (2020): „What are the social outcomes of climate policies? A systematic map and review of the ex-post literature", Environmental Research Letters, 15 (11), 113006.

Le Quéré, C. / Raupach, M. R. / Canadell, J. G. / Marland, G. / Bopp, L. / Ciais, P. / Conway, T. J. / Doney, S. C. / Feely, R. A. / Foster, P. / Friedlingstein, P. / Gurney, K. / Houghton, R. A. / House, J. I. / et al. (2009): „Trends in the sources and sinks of carbon dioxide", Nature Geoscience, 2 (12), S. 831–836.

Lenton, T. M. / Held, H. / Kriegler, E. / Hall, J. W. / Lucht, W. / Rahmstorf, S. / Schellnhuber, H. J. (2008): „Tipping elements in the Earth's climate system", Proceedings of the National Academy of Sciences, 105 (6), S. 1786–1793.

Lenton, T. M. / Rockström, J. / Gaffney, O. / Rahmstorf, S. / Richardson, K. / Steffen, W. / Schellnhuber, H. J. (2019): "Climate tipping points — too risky to bet against", Nature, 575 (7784), S. 592–595.

Liu, J. / Hull, V. / Batistella, M. / DeFries, R. / Dietz, T. / Fu, F. / Hertel, T. W. / Izaurralde, R. C. / Lambin, E. F. / Li, S. / Martinelli, L. A. / McConnell, W. J. / Moran, E. F. / Naylor, R. / et al. (2013): „Framing Sustainability in a Telecoupled World", Ecology and Society, 18 (2).

MacDougall, A. H. (2021): „Estimated effect of the permafrost carbon feedback on the zero emissions commitment to climate change", Biogeosciences, 18 (17), S. 4937–4952.

Milkoreit, M. (2022): „Social tipping points everywhere?—Patterns and risks of overuse", WIREs Climate Change, 14 (2), e813.

Milkoreit, M. / Hodbod, J. / Baggio, J. / Benessaiah, K. / Calderón-Contreras, R. / Donges, J. F. / Mathias, J.-D. / Rocha, J. C. / Schoon, M. / Werners, S. E. (2018): „Defining tipping points for social-ecological systems scholarship—an interdisciplinary literature review", Environmental Research Letters, 13 (3), 033005.

Minx, J. C. / Lamb, W. F. / Callaghan, M. W. / Fuss, S. / Hilaire, J. / Creutzig, F. / Amann, T. / Beringer, T. / Oliveira Garcia, W. de / Hartmann, J. / Khanna, T. / Lenzi, D. / Luderer, G. / Nemet, G. F. / et al. (2018): „Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis", Environmental Research Letters, 13 (6), 063001.

Moser, S. C. / Dilling, L. (2007): „Toward the social tipping point: creating a climate for change", in: Creating a Climate for Change, editiert von: Moser, S. C. & Dilling, L., Cambridge University Press, S. 491–516.

OECD (2022): „Climate Tipping Points: Insights for Effective Policy Action", online verfügbar unter: https://www.oecd.org/environment/climate-tipping-points-abc5a69e-en.htm, [Zuletzt aufgerufen: 05.12.2022].

Our World in Data (2022): „Per capita consumption-based CO2 emissions", online verfügbar unter: https://ourworldindata.org/grapher/consumption-co2-per-capita?tab=table, [Zuletzt aufgerufen: 16.05.2023].

Paterson, M. (2021): „Climate change and international political economy: between collapse and transformation", Review of International Political Economy, 28 (2), S. 394–405.

Patt, A. / Lilliestam, J. (2018): „The Case against Carbon Prices", Joule, 2 (12), S. 2494–2498.

Pisani-Ferry, J. (2021): „Climate policy is macroeconomic policy, and the implications will be significant", Peterson Institute for International Economics, online verfügbar unter: https://www.piie.com/sites/default/files/documents/pb21-20.pdf, [Zuletzt aufgerufen: 16.05.2023].

Rehm, M. / Huwe, V. / Bohnenberger, K. (2021): „Klimasoziale Transformation: Ökologische Nachhaltigkeit & soziale Kohäsion sind kein Widerspruch", Bertelsmannstiftung, online verfügbar unter: https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/unsere-projekte/nachhaltig-wirtschaften/projektnachrichten/klimasoziale-transformation, [Zuletzt aufgerufen: 09.03.2023].

Rehm, Y. / Chancel, L. (2022): „Measuring the Carbon Content of Wealth Evidence from France and Germany", World Inequality Lab, online verfügbar unter: https://wid.world/document/measuring-the-carbon-content-of-wealth-evidence-from-france-and-germany-rehm-y-chancel-l/, [Zuletzt aufgerufen: 16.05.2023].

Ricke, K. / Drouet, L. / Caldeira, K. / Tavoni, M. (2018): „Country-level social cost of carbon", Nature Climate Change, 8 (10), S. 895–900.

Ritchie, P. D. L. / Clarke, J. J. / Cox, P. M. / Huntingford, C. (2021): „Overshooting tipping point thresholds in a changing climate", Nature, 592 (7855), S. 517–523.

Rohde, R. (2022): „Global Temperature Report for 2021", Berkeley Earth, online verfügbar unter: https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2021/, [Zuletzt aufgerufen: 12.5.2023].

Rosenbloom, D. / Markard, J. / Geels, F. W. / Fuenfschilling, L. (2020): „Why carbon pricing is not sufficient to mitigate climate change—and how "sustainability transition policy" can help", Proceedings of the National Academy of Sciences, 117 (16), S. 8664–8668.

Serdeczny, O. / Lissner, T. (2023): „Research agenda for the loss and damage fund", Nature Climate Change, 13 (412), S. 1.

Sgubin, G. / Swingedouw, D. / Drijfhout, S. / Mary, Y. / Bennabi, A. (2017): „Abrupt cooling over the North Atlantic in modern climate models", Nature Communications, 8 (1), 14375.

Song, H. / Kemp, D. B. / Tian, L. / Chu, D. / Song, H. / Dai, X. (2021): „Thresholds of temperature change for mass extinctions", Nature Communications, 12 (1), 4694.

Steffen, W. / Rockström, J. / Richardson, K. / Lenton, T. M. / Folke, C. / Liverman, D. / Summerhayes, C. P. / Barnosky, A. D. / Cornell, S. E. / Crucifix, M. / Donges, J. F. / Fetzer, I. / Lade, S. J. / Scheffer, M. / et al. (2018): „Trajectories of the Earth System in the Anthropocene", Proceedings of the National Academy of Sciences, 115 (33), S. 8252–8259.

Stommel, H. (1961): „Thermohaline Convection with Two Stable Regimes of Flow", Tellus, 13 (2), S. 224–230.

Tarnocai, C. / Canadell, J. G. / Schuur, E. a. G. / Kuhry, P. / Mazhitova, G. / Zimov, S. (2009): „Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region", Global Biogeochemical Cycles, 23 (2).

Trenzcek, J. / Lühr, O. / Eiserbeck, L. / Sandhövel, M. / Leuschner, V. (2022): „Extremwetterschäden in Deutschland seit 2018", Prognos AG, in Kooperation mit IÖW und GWS, online verfügbar unter: https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_Kurzzusammenfassung_Extremwettersch%C3%A4den%20seit%202018_AP2_3d_.pdf, [Zuletzt aufgerufen: 16.05.2023].

Turetsky, M. R. / Abbott, B. W. / Jones, M. C. / Anthony, K. W. / Olefeldt, D. / Schuur, E. A. G. / Grosse, G. / Kuhry, P. / Hugelius, G. / Koven, C. / Lawrence, D. M. / Gibson, C. / Sannel, A. B. K. / McGuire, A. D. (2020): „Carbon release through abrupt permafrost thaw", Nature Geoscience, 13 (2), S. 138–143.

Wang, S. / Foster, A. / Lenz, E. A. / Kessler, J. D. / Stroeve, J. C. / Anderson, L. O. / Turetsky, M. / Betts, R. / Zou, S. / Liu, W. / Boos, W. R. / Hausfather, Z. (2023): „Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements", Reviews of Geophysics, 61 (1), e2021RG000757.

Winkelmann, R. / Donges, J. F. / Smith, E. K. / Milkoreit, M. / Eder, C. / Heitzig, J. / Katsanidou, A. / Wiedermann, M. / Wunderling, N. / Lenton, T. M. (2022): „Social tipping processes towards climate action: A conceptual framework", Ecological Economics, 192, 107242.

WMO (2022): „United in Science: We are heading in the wrong direction", online verfügbar unter: https://public.wmo.int/en/media/press-release/united-science-we-are-heading-wrong-direction, [Zuletzt aufgerufen: 22.10.2022].

Wunderling, N. / Donges, J. F. / Kurths, J. / Winkelmann, R. (2021): „Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming", Earth System Dynamics, 12 (2), S. 601–619.

Xu, C. / Kohler, T. A. / Lenton, T. M. / Svenning, J.-C. / Scheffer, M. (2020): „Future of the human climate niche", Proceedings of the National Academy of Sciences, 117 (21), S. 11350–11355.

Das Dezernat Zukunft ist eine überparteiliche Vereinigung, die Geld-, Finanz- und Wirtschaftspolitik verständlich, kohärent und relevant erklären und neu denken will. Dabei leiten uns unsere Kernwerte:
Demokratie, Menschenwürde und breit verteilter Wohlstand.

www.dezernatzukunft.org

@DezernatZ

Diese Arbeit wurde unterstützt von der European Climate Foundation, Franziska-und-Otto-Bennemann Stiftung, Laudes Foundation, Partners for a New Economy, Hewlett Foundation und Open Philanthropy.

Impressum

Veröffentlicht durch:
Dezernat Zukunft e.V.,
Tieckstraße 37, 10115 Berlin
www.dezernatzukunft.org

Vertretungsberechtigter Vorstand:
Dr. Maximilian Krahé

Vorstand:
Dr. Maximilian Krahé, Dr. Maximilian Paleschke, Nicolas Gassen

Vereinsregister des Amtsgerichts Charlottenburg
Vereinsregisternummer 36980 B
Inhaltlich Verantwortlicher nach §18 MstV: Dr. Maximilian Krahé

Herausgeber:
Dr. Maximilian Krahé, Hamburg
E-Mail: max.krahe@dezernatzukunft.org

Design:
Burak Korkmaz

Diese Arbeit von Dezernat Zukunft ist lizensiert unter der CC BY-NC 4.0.

Die Inhalte können mit klarer Kennzeichnung der Quelle und, sofern angegeben, unter Angabe des Autors bzw. der Autorin verwendet werden.