

WAS SIND KIPP-PUNKTE?

EIN BLICK IN DIE ERKENNTNISSE DER KLIMAFORSCHUNG

Ein Kipp-Punkt (engl.: „Tipping-Point“) bezeichnet den Zeitpunkt, in dem in einem System selbst kleine Änderungen drastische und nicht umkehrbare Veränderungen im Verhalten des Systems bewirken. Dieses Phänomen ist in komplexen Systemen weit verbreitet, zum Beispiel in biologischen, sozialen, wirtschaftlichen – und auch im Klimasystem. Bereits 1987 beschrieb Wallace S. Broecker in einem Kommentar in der Zeitschrift Nature – „Unpleasant surprises in the greenhouse?“ – die Gefahr, dass erhöhte Emissionen an Treibhausgasen (THG) plötzliche Veränderungen im Klima verursachen können. Auch Belege aus historischen Klimaaufzeichnungen weisen auf das Auftreten solcher abrupten Übergänge hin [1].

2008 beschrieb ein Forscherteam kritische Schwellen im Klimasystem

In einer wegweisenden Veröffentlichung von 2008 führten Tim Lenton und sein Team den Begriff „kritisches Element“ ein. Sie beschrieben damit Teile des Erdsystems, die durch vom Menschen verursachte Klimaveränderungen an einen Kipp-Punkt getrieben werden könnten [2]. Sie definierten einen Klima-Kippunkt als eine Schwelle in einem entscheidenden Parameter. Ein Beispiel hierfür ist die zunehmende glo-

bale Durchschnittstemperatur: Sie steigt schon seit einiger Zeit. Bis jetzt allerdings ohne globale Systemelemente zu kippen. Aber sobald die Temperaturschwelle für das betrachtete kritische Element erreicht ist, führt selbst eine geringfügige zusätzliche Erwärmung das System in einen völlig anderen Zustand. Selbstverstärkende Rückkopplungen sind ein weiteres Merkmal von Kipp-Punkten. Das gekippte Element treibt das Klimasystem in einen neuen Zustand. In diesem strebt das System wieder nach Stabilität. Neue Rückkopplungen entstehen und erhalten die veränderten Bedingungen aufrecht, etwa die erhöhte Temperatur.

Politikrelevante Kipp-Elemente

Fachleute identifizieren potenzielle Klima-Kipp-Punkte. Ihre Urteile basieren auf Beobachtungen, paläoklimatischer Evidenz und Ergebnissen aus global koordinierten Klimamodellierungsprojekten, wie sie auch vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verwendet werden. Dabei erfolgt eine Abschätzung, ob es zu selbstverstärkenden Effekten kommt, bei welcher Temperatur solche Veränderungen beginnen, ob diese Veränderungen unumkehrbar sind und wie schnell diese Übergänge ablaufen können. Zuletzt wird bewertet, welche Folgen diese Veränderungen auf globaler oder regionaler Ebene haben.

Welche Kipp-Elemente hängen mit menschlichen Aktivitäten zusammen?

Ein Kipp-Punkt kann auch natürlich ohne menschlichen Einfluss auftreten, wie etwa während der „Schneeball-Erde“-Ereignisse vor vielen Millionen Jahren. Allerdings sind diese natürlichen Ereignisse im Kontext der vom Menschen verursachten Erwärmung nicht relevant. Der Schwerpunkt liegt vielmehr auf Kipp-Elementen, die maßgeblich mit menschlichen Aktivitäten zusammenhängen. Das bedeutet: Sie werden wesentlich von menschlichen Handlungen wie THG-Emissionen und Veränderungen in der Landnutzung beeinflusst; Entscheidungen, die innerhalb eines „politischen Zeithorizonts“ getroffen werden (ungefähr hundert Jahre), sind für das Erreichen einer kritischen Schwelle relevant; die Zeit, um eine grundlegende Veränderung im System beobachten zu können, fällt in einen „ethischen Zeithorizont“ (ungefähr tausend Jahre); und sie haben das Potenzial, grundlegende Veränderungen im gesamten Erdsystem auszulösen.

Kipp-Elemente in Ökosystemen und weiteren Bereichen

Mithilfe dieser Bedingungen haben McKay und weitere Forschende globale und regionale Kipp-Elemente identifiziert, die sowohl das Klimasystem als auch

	Kipp-Elemente und Kippunkte im Klimasystem	Schwellenwert Erwärmung ΔT (°C)			Zeitskala (Jahre)			zusätzliche Auswirkungen auf ΔT (°C)	
		Beste Schätzung	Min.	Max.	Beste Schätzung	Min.	Max.	Global	Regional
Eisschilde und Meereis	Grönlandeisschild (Kollaps)	1,5	0,8	3,0	10k	1k	15k	0,13	0,5 bis 3,0
	Westantarktischer Eisschild (Kollaps)	1,5	1,0	3,0	2k	500	13k	0,05	1,0
	Ostantarktische subglaziale Becken (Kollaps)	3,0	2,0	6,0	2k	500	10k	0,05	?
	Antarktisches Winter-Meereis (Kollaps)	6,3	4,5	8,7	20	10	100	0,60	0,6 bis 1,2
	Ostantarktischer Eisschild (Kollaps)	7,5	5,0	10,0	?	10k	?	0,60	2,0
Ozeanzirkulationen	Labrador-Irminger Meere/SPW Konvektion (Kollaps)	1,8	1,1	3,8	10	5	50	-0,5	-3,0
	Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation (Kollaps)	4,0	1,4	8,0	50	15	300	-0,50	-4 bis -10
Ökosysteme	amazonas Regenwald (Absterben)	3,5	2,0	6,0	100	50	200	teilweise/0,1°C	0,4 bis 2,0
	Borealer Permafrost (Kollaps)	4,0	3,0	6,0	50	10	300	gesamt /0,2°C	-

Quelle: CCCA

Kipp-Elemente im Klimasystem, aufgeteilt nach den Bereichen im Erdsystem: Ökosysteme, Ozeanzirkulationen sowie Eisschilde und Meereis, angelehnt an Armstrong Mc Kay [3]

die menschliche Gesellschaft bedrohen. Die Tabelle fasst die wichtigsten Kipp-Punkte zusammen, nach Kategorien (erste Spalte) und der Stärke der Erderwärmung (zweite Spalte), die den Kipp-Punkt auslöst. Die Werte umfassen die beste Schätzung sowie minimale und maximale Werte. Zusätzlich beschreibt die dritte Spalte die Zeiträume, die das System benötigt, um in den neuen Zustand überzugehen und sich dort zu stabilisieren. Auch hier werden beste, minimale und maximale Schätzungen angegeben. Die letzte Spalte zeigt die Temperaturänderung an, die durch Erreichung des Kipp-Punkts zusätzlich entstehen würde. Um die Interpretation zu erleichtern, ist das Vertrauen der Wissenschaft in die Aussagen farb-codiert: Grün steht für hohes Vertrauen, gelb bedeutet mittleres Vertrauen und rot steht für niedriges Vertrauen in die Schätzungen des Schwellenwerts, der Zeitskala und der Auswirkungen.

Laut McKay et al. gibt es wichtige globale Kipp-Punkte, die wahrscheinlich bei einer Erwärmung von 1,5 bis knapp unter 2 °C, dem Zielbereich des Pariser Abkommens, überschritten werden könnten. Diese sind: Kollaps des Grönland-eisschildes, Kollaps des Westantarktischen Eisschildes, Kollaps der Konvektion im Labrador- und Irminger Meer/ des nordatlantischen subpolaren Wirbels (siehe auch Hervorhebung in der Tabelle).

Jedoch erhöht sich das Risiko deutlich, dass diese Kipp-Punkte eintreten und weitere hinzukommen, wenn wir eine Erwärmung von 2 bis 3 °C betrachten. Außerdem könnten diese Kipp-Punkte miteinander verknüpft sein: Wird einer erreicht, kann sich die Wahrscheinlichkeit zusätzlich erhöhen, dass nacheinander auch andere ausgelöst werden [4].

Großräumige Komponenten, die einen Kipp-Punkt erreichen können

Kollaps des Grönlandeischildes: Der Grönlandeischild schrumpft sehr schnell wegen zunehmender Oberflächenschmelze und beschleunigtem Abbrechen von Eis ins Meer. Alles deutet darauf hin, dass er sich einem kritischen Kipp-Punkt nähert. Seine Dicke von bis zu 3 km hat bis jetzt dazu beigetragen, dass die Oberfläche hoch gelegenen, kalten Luftschichten ausgesetzt war. Das sorgte für einen stabilen Eisschild. Durch das Schmelzen verliert er jedoch an Höhe, was zu wärmeren Temperaturen an seiner Oberfläche und zu immer mehr Abschmelzung führt. Modellsimulationen legen einen Schwellenwert bei etwa 1,5 °C Temperaturanstieg nahe, ab dem das Schmelzen selbstverstärkend werden könnte. Würde der gesamte Grönland-

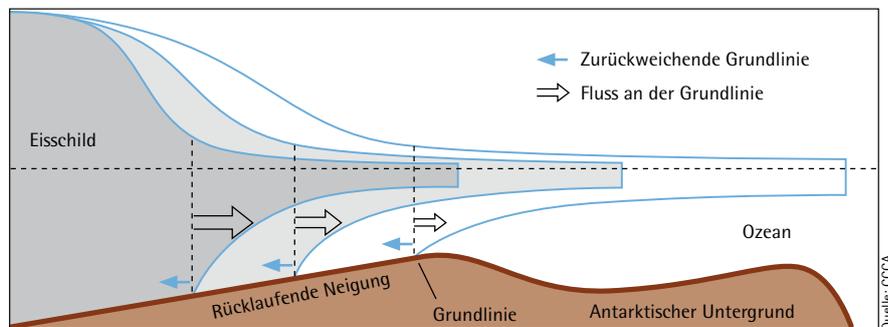


Bild 1: Darstellung des Übergangsbereichs zum Ozean: Der Eisschild zieht sich zurück und erreicht rüchlaufig geneigte Hänge, angelehnt an Pattyn [7]

eisschild schmelzen, könnte der globale Meeresspiegel um etwa sieben Meter steigen [5].

Kollaps des Westantarktischen Eisschildes: Große Teile des Westantarktischen Eisschildes liegen unter dem Meeresspiegel. Wenn das Eis durch wärmere Luft- und Wassertemperaturen schmilzt, zieht sich auch der Boden des Eisschildes zurück. Die Grundlinie befindet sich an vielen Stellen auf Hängen, die sich zum Eisschild hinneigen. Das ermöglicht es wärmerem Meerwasser zwischen Untergrund und Eisschild einzudringen und löst einen selbstverstärkenden Rückzug aus (siehe Bild). Das komplette Schmelzen des Eisschildes könnte den globalen Meeresspiegel um etwa fünf Meter ansteigen lassen [6].

Kollaps der Konvektion in den Labrador- und Irmingermeeren sowie des Nordatlantischen subpolaren Wirbels: Subpolarer Wirbel ist die Bezeichnung für ein Kreislaufsystem von Meeresströmungen im Atlantik. Im Winter kühlt das Wasser an der Oberfläche ab und erlaubt so die Bildung von Tiefenwasser. Dabei sinkt Meerwasser von der Oberfläche in tiefe Schichten ab, weil es sehr kalt und salzhaltig und somit sehr dicht ist. Dieser Prozess beeinflusst die atlantische meridionale Umwälzzirkulation, die Wärme im Atlantik nach Norden transportiert. Das Absinken wird durch wärmere Winter und einen geringeren Salzgehalt abgeschwächt. Die Gründe hierfür sind mehr Niederschlag und schmelzende Eisschilde, die große Mengen Süßwasser beimischen und so die Dichte des Oberflächenwassers verringern. Modellsimulationen deuten auf einen möglichen Kollaps bei etwa 1,8 °C Klimaerwärmung innerhalb von etwa zehn Jahren hin (Bereich: 1,1 bis 3,8 °C). Das könnte zu einer regionalen Abkühlung von 2 bis 3 °C im Nordatlantik und möglicherweise 0,5 °C weltweit führen. Diese Verschiebung könnte den Jetstream nach Norden drängen und extremes Wetter in Europa verursachen sowie die Stärke der Umwälzzirkulation beeinträchtigen.

Quellen

- [1] Brovkin et al., 2021. Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system, *Nat. Geosci.*, 14, 550-558.
- [2] Lenton et al., 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 105(6), 1786-1793.
- [3] Armstrong McKay et al., 2022. Exceeding 1.5 C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611).
- [4] Kriegler et al. 2009. Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 106(13), 5041-5046.
- [5] Masson-Delmotte et al., 2021. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC.*
- [6] Naughten et al., 2023. Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century. *Nature Climate Change*, 1-7.
- [7] Pattyn, F. (2018). The paradigm shift in Antarctic ice sheet modelling. *Nature communications*, 9(1), 2728.

ZU DEN AUTOREN:

► **Albert Ossó**
Assistenzprofessor und stellvertretender Leiter der Forschungsgruppe „Atmosphärische Dynamik, Jetstream, Extremereignisse, saisonale Vorhersagen“, Universität

► **Laurenz Roither**
Mitarbeiter am Climate Change Centre Austria (CCCA)

Das ist eine gekürzte Fassung des CCCA-Fact-Sheet Nr. 47 – „Kippunkte im Klimasystem“ – das auf der Website verfügbar ist:

ccca.ac.at/wissenstransfer/fact-sheets