

CLIMATE TIPPING POINTS

Das Umkippen essentieller
Klimasysteme als globales Risiko



„Mit dem Überschreiten von 1,5°C globaler Erwärmung riskieren wir den Verlust zentraler Kippelemente wie Grönlands, Atlantische Umwälzzirkulation und Amazonas-Regenwald. Um sie zu schützen ist eine entschlossene Umsetzung der Pariser Klimaziele unerlässlich.“

Prof. Dr. Nico Wunderling, Professor für Erdsystemwissenschaften am Center for Critical Computational Studies (C³S) der Goethe-Universität Frankfurt und Wissenschaftler am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung



Quelle Titelbild: KI-generiertes Bild mit Adobe Firefly, 2025

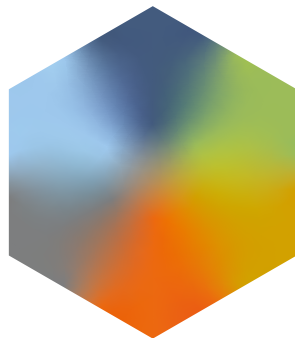
STUDIE

CLIMATE TIPPING POINTS

Das Umkippen essentieller
Klimasysteme als globales Risiko

Dr. Heinz-Werner Rapp

Mit Expertenbeiträgen von
Prof. Dr. Nico Wunderling und Antje Biber



*Erkennen
ist mehr
als Sehen*

„The world has entered a new reality. Global warming will soon exceed 1.5°C. This puts humanity in the danger zone where multiple climate tipping points pose catastrophic risks to billions of people.“

University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report)

„Bereits das Überschreiten einzelner Kippunkte hat weitreichende Umweltauswirkungen, welche die Lebensgrundlage vieler Menschen gefährden. Es besteht zudem das Risiko, dass durch Rückkopplungsprozesse weitere Kippunkte im Erdsystem überschritten werden und so eine dominoartige Kettenreaktion ausgelöst wird.“

PIK (2025, Erdsystem)

„We are on a highway to climate hell, with our foot still on the accelerator.“

António Guterres, UN-Generalsekretär, 2024

Persönliche Botschaft von Prof. Dr. Nico Wunderling, Professor für Erdsystemwissenschaften am Center for Critical Computational Studies (C³S) der Goethe-Universität Frankfurt und Klimaforscher am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung:

„Diese Analyse ist von grundlegender Bedeutung, weil sie die größten systemischen Risiken des Klimawandels klar benennt und in den Kontext wirtschaftlicher und finanzieller Risikodimensionen stellt. Im Fokus stehen zentrale Kippelemente des Erdsystems – wie der Grönländische Eisschild, die Atlantische Umwälzirkulation (AMOC), der Amazonas-Regenwald sowie deren Interdependenzen. Deren Umkippen hätte dramatische Folgen: von mehreren Metern Meeresspiegelanstieg über gravierende Veränderungen des Klimas auf der Nordhalbkugel und insbesondere in Europa, bis hin zu einer massiven Gefährdung globaler Artenvielfalt. Die Analyse zeigt unmissverständlich auf, vor welchen Herausforderungen auch die globalen Wirtschafts- und Finanzsysteme stehen und welche politischen wie gesellschaftlichen Lösungen notwendig sind, um die Kippelemente des Klimas stabil zu halten. Für Investoren und Entscheidungsträger in der Finanzwelt ist die Analyse ein wichtiger Referenzpunkt – und ein klarer Weckruf, um diesbezügliche Risikoerwartungen neu zu kalibrieren.“



Prof. Dr. Nico Wunderling

Bad Homburg, Oktober 2025

VORWORT

Liebe Leserinnen und Leser,

das Problem der Erderwärmung formiert sich – oftmals noch unterschätzt oder ignoriert – zu einem äußerst mächtigen „Megatrend“. Dieser wird in den nächsten Jahren immer stärker auf alle Lebensbereiche einwirken und viele Grundpfeiler des globalen Systems massiv unter Druck setzen.

Ein wichtiger Treiber liegt im Phänomen der **Klimakippunkte** (*Climate Tipping Points*). Dieser Aspekt betrifft sensible Bereiche des Klimasystems, die sogenannten **Kippelemente**. Werden dort kritische Schwellenwerte („*Tipping Points*“) überschritten, verlieren diese Elemente ihre Stabilität und gehen in einen anderen Systemzustand über – mit hoher Eigendynamik und meist irreversibel. Inhärente Selbstverstärkungsmechanismen beschleunigen die Kippprozesse und erhöhen deren Kritikalität.

Da das Klimasystem eng vernetzt ist, kann das Kippen eines Elements auch andere Kippelemente „anstoßen“ und damit weitreichende **Kippkaskaden** auslösen. Klimaschäden können sich so in ihren negativen Wirkungen kumulieren und potenzieren. Dieses Phänomen dürfte erklären, warum das reale Ausmaß heutiger Klimaveränderungen frühere Prognosen immer wieder signifikant übertrifft.

Die Klimaforschung geht heute davon aus, dass unser Planet bei rund 1,5°C Erderwärmung wichtigen Kippunkten gefährlich nahekommt – oder diese bereits überschritten hat! Akute Risiken zeigen sich in Bereichen wie dem Grönlandeis, den Permafrostböden sowie wichtigen Nordatlantikströmungen. Die zugehörigen Kippkaskaden und deren globale Konsequenzen wären äußerst schwerwiegend – werden aber in ihrer Gesamtheit oft noch sträflich unterschätzt: Eine Beschleunigung der planetaren Erwärmung hätte eine **Vielzahl existenzieller Bedrohungen** für Biodiversität und Lebensräume zur Folge – nicht zuletzt einen scharfen Anstieg des Meeresspiegels!

Vom Klimawandel direkt betroffen ist auch das globale **Finanzsystem**, das durch rapide anwachsende Klimaschäden und deren abnehmende Versicherbarkeit perspektivisch unter Druck gerät. Neue Konzepte wie „*Planetary Solvency*“ und „*Protection Gap*“ implizieren eine scharfe **Neubewertung** bislang unterschätzter Klimarisiken – vermehrt auch an den globalen Kapitalmärkten!

Die vorliegende Studie analysiert die komplexen Ursachen und Wirkungsmuster der *Climate Tipping Points* sowie daraus resultierende Risiken für Umwelt und Gesellschaft, aber auch für Wirtschaft und Finanzsysteme. Letzterer Aspekt wird oftmals unterschätzt und steht deshalb im Fokus von Kapitel 6; einer umfassenden Würdigung relevanter Klimakippunkte dient Kapitel 5, während Kapitel 4 spezielle Phänomene wie Rückkopplungen, Nichtlinearität und Irreversibilität vertieft.

Thema und Grundaussage der vorliegenden Arbeit sind keine „leichte Kost“ – dennoch sollte ihre Botschaft klar zur Kenntnis genommen werden: Der Klimawandel führt schon jetzt zu enormen Herausforderungen, die durch die *Climate Tipping Points* weiter verschärft und beschleunigt werden. Daraus resultiert eine große Verantwortung gegenüber künftigen Generationen, die mit der bedrohlichen Kippdynamik eines sich immer stärker aufheizenden Planeten leben müssen.

Unternehmer und Investoren sollten diese Zusammenhänge klar erkennen und umfassend verstehen.

Wir wünschen eine aufrüttelnde Lektüre!

Dr. Heinz-Werner Rapp

Gründer & Leiter Steering Board
FERI Cognitive Finance Institute

Abstract (KI-generiert*)

Die Studie befasst sich mit den Dynamiken und Risiken sogenannter *Climate Tipping Points (CTPs)*, kritischer Kippunkte im Erdsystem, deren Überschreiten abrupt, irreversibel und mit weitreichenden Folgen verbunden sein kann. Im Zentrum steht die Erkenntnis, dass diese Kippprozesse nicht isoliert, sondern hochgradig vernetzt sind und sich durch Rückkopplungen gegenseitig verstärken können.

Zu den zentralen Kippelementen zählen die Eisschilde Grönlands und der Antarktis, der Amazonas-Regenwald sowie die Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC) und der Subpolare Wirbel (SPG). Die Hauptursache für das Näherrücken dieser Kippunkte ist die zunehmende Erderwärmung. Dahinter steht der menschengemachte Ausstoß von Treibhausgasen, insbesondere CO₂ und Methan, der seit Beginn des industriellen Zeitalters massiv zugenommen hat. Bereits 2024 wurde die kritische 1,5°C-Marke überschritten – ein Wert, bei dem laut Forschung erste Kippunkte ausgelöst werden könnten.

Kapitel 6 analysiert die weitreichenden Folgen dieser Entwicklungen: Zunächst wird deutlich, dass eine beschleunigte Verschärfung negativer Klimaeffekte zu erwarten ist. Selbst moderate Erwärmungsszenarien können zentrale Kippelemente wie Eisschilde, Regenwälder oder Meeresströmungen destabilisieren, was Rückkopplungs- und Kaskadeneffekte auslöst und die globale Erwärmung verstärkt. Dadurch drohen tiefgreifende ökologische Schäden, etwa durch steigende Meeresspiegel, Verlust von Biodiversität oder den Zusammenbruch ganzer Ökosysteme.

Auch ökonomisch entstehen gravierende Belastungen: Klimabedingte Schäden übertreffen vielfach frühere Prognosen, und durch neue Erkenntnisse zu den CTPs ändern sich Risikoeinschätzungen grundlegend. Versicherungen, Kapitalmärkte und Volkswirtschaften sehen sich wachsenden „*High Impact – High Probability*“-Ereignissen ausgesetzt. Das führt zu neuen Ansätzen wie dem Konzept der „*Planetary Solvency*“, das Klimarisiken systematisch in ökonomische Analysen integriert.

Darüber hinaus ergeben sich massive politische und gesellschaftliche Herausforderungen: Extreme Wetterereignisse, klimabedingte Migration und Gefährdungen von Infrastruktur erhöhen den Druck auf bestehende Institutionen und verstärken soziale Spannungen. Gleichzeitig hemmen politische Polarisierung und Klimaskepsis dringend notwendige Maßnahmen. Dies verdeutlicht ein zentrales Spannungsverhältnis: Während die wissenschaftliche Dringlichkeit unstrittig ist, bleiben öffentliche Wahrnehmung und politische Handlungsbereitschaft oft zurück.

Die Studie betont einen exponentiell wachsenden Handlungsdruck für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Eine drastische Reduktion von Emissionen, die Stärkung von Resilienz, Frühwarnsysteme, sowie internationale Koordination sind unverzichtbar. Insgesamt wird deutlich: Die Existenz von Climate Tipping Points hebt die Klimakrise auf ein neues Niveau systemischer Bedrohung, das nur durch entschlossenes und sofortiges Handeln eingedämmt werden kann.

* KI-generierte Zusammenfassung der vorliegenden Studie durch ChatGPT und Copilot.
(Prompt: Erstelle eine einseitige Zusammenfassung der Studie unter besonderer Berücksichtigung von Kapitel 6, 19.09.2025)

Wie funktioniert der Treibhauseffekt und wie empfindlich reagiert die Umwelt, wenn die Menschheit den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß ungebremst fortsetzt? Mehr dazu in diesem Video:



INHALT

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
1 Executive Summary	4
2 Einführung und Hintergrund	8
3 Aktueller Stand der Wissenschaft	12
3.1 Ausgangslage und Problemdimension	12
3.1.1 Globale Erwärmung und Treibhauseffekt	12
3.1.2 Das Problem der Treibhausgase	14
3.1.3 Die Beziehung zwischen Treibhauseffekt und Erderwärmung	16
3.2 Wissenschaftlicher Kontext und Bezüge zur Klimaforschung	20
3.2.1 Das globale Klima als komplexes dynamisches System	20
3.2.2 Kippelemente und Kippunkte im globalen Klimasystem	24
3.2.3 Der Beitrag moderner Simulationsverfahren zur Abschätzung von Klimarisiken	28
3.3 Grundsätzliche Risikoszenarien und zeitliche Einordnung	30
4 Eigenschaften von Klimakippunkten	36
4.1 Modulation: Die Steuerung komplexer Systeme	36
4.2 Dynamik: Die Rolle kritischer Schwellenwerte	37
4.3 Nichtlinearität: Das Phänomen der Kaskadeneffekte	40
4.4 Dominoeffekte: Die Bedeutung multipler Interdependenzen	41
4.5 Feedback Loops: Die Macht positiver Rückkopplungen	44
4.6 Irreversibilität: Das Problem der Unumkehrbarkeit	46
5 Kippunkte und Kippdynamiken im globalen Klimasystem	50
5.1 Hintergrund und Abgrenzung	50
5.2 Abschmelzen polarer Eisschilde und Polkappen	53
5.3 Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC) und Subpolarer Wirbel (SPG)	72
5.4 Tropische Regenwälder und Amazonas-Ökosystem	86
5.5 Ozeanische Erwärmung und Versauerung	98
5.6 Auftauen von Permafrostböden und Methanfreisetzung	110
5.7 Gebirgsgletscher und alpine Strukturen	120
5.8 Atmosphärische Höhenströmungen (Jetstreams)	126
6 Weitreichende Folgen der Climate Tipping Points	130
6.1 Absehbare Beschleunigung adverser Klimaeffekte	130
6.2 Gravierende ökologische und ökonomische Konsequenzen	136
6.3 Unterschätzte Risiken für Finanzsysteme und Kapitalmärkte	144
6.4 Massive politische und gesellschaftliche Herausforderungen	155
6.5 Zunehmender Handlungsdruck für Politik und Öffentlichkeit	159
6.6 Grundlegende Anforderungen und Handlungsoptionen	164
7 Fazit und Ausblick	174
Literaturverzeichnis	183

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Globales Klimasystem als Interaktion vielfältiger Sphären des Erdsystems	9
Abb. 2:	Grundsätzliche Wirkungsweise systemischer Kippelemente und Kippunkte	10
Abb. 3:	Rekordhohe Konzentration von Kohlendioxid in der Erdatmosphäre	13
Abb. 4:	Deutliche Zunahme globaler Treibhausgasemissionen in den letzten Jahrzehnten	14
Abb. 5:	Sektorale Verteilung der wichtigsten CO ₂ -Emittenten	15
Abb. 6:	Deutlicher Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur	17
Abb. 7:	Kausale Beziehung zwischen Erderwärmung und Treibhausgasemissionen	17
Abb. 8:	Überproportionaler Anstieg der Durchschnittstemperaturen in Deutschland	19
Abb. 9:	Klimasystem als Ergebnis komplexer Prozesse und Wechselwirkungen	20
Abb. 10:	Karte der wichtigsten Kippelemente des Klimasystems	25
Abb. 11:	Globale Kippelemente und deren wahrscheinliche Kippunkte	26
Abb. 12:	Synapse globaler Klimakippunkte mit Wahrscheinlichkeitseinschätzung	27
Abb. 13:	Interaktionen zwischen Kippelementen und kaskadischen Kippdynamiken	32
Abb. 14:	Rapide Beschleunigung der globalen Erwärmung in den letzten Jahren	35
Abb. 15:	Kritische Temperaturbereiche für das Auslösen wichtiger Kippunkte	39
Abb. 16:	Komplexe Interdependenzen der Kippelemente im globalen Klimasystem	43
Abb. 17:	Unterschätzung komplexer Interdependenzen und kritischer Kippdynamiken	45
Abb. 18:	Die fünf wichtigsten Klimakippunkte sowie nachgelagerte Kippdynamiken	51
Abb. 19:	Dynamik der Erderwärmung impliziert erhöhte systemische Kritikalität	53
Abb. 20:	Die Kryosphäre und ihre Komponenten in der Nord- und Südhemisphäre	54
Abb. 21:	Phänomen der überproportionalen arktischen Erwärmung	55
Abb. 22:	Grundprinzip des Eis-Schnee-Albedo-Effekts	57
Abb. 23:	Progressiver Rückgang des Nordpolareises als „Arktische Todesspirale“	58
Abb. 24:	Signifikant rückläufiges Eisvolumen in der Arktis	59
Abb. 25:	Projektion eines anhaltenden Rückgangs beim arktischen Meereis	60
Abb. 26:	Anhaltendes Abschmelzen des grönländischen Eisschildes	63
Abb. 27:	Signifikanter Verlust an Eismassen in Grönland	63
Abb. 28:	Weiträumige Eisverluste in Grönland und der Antarktis	64
Abb. 29:	Rückgang des Meereises in der Arktis (seit 1980)	65
Abb. 30:	Rückgang des Meereises in der Antarktis (seit 1980)	65
Abb. 31:	Deutlicher Rückgang des antarktischen Meereises	66
Abb. 32:	Signifikante Erhöhung des Meeresspiegels durch globale Eisschmelze	70
Abb. 33:	Komplexe Grundmechanismen und Auswirkungen der polaren Eisschmelze	72
Abb. 34:	Schematische Darstellung der globalen Thermohalinen Zirkulation	74
Abb. 35:	Wärmetransport im Nordatlantik durch die AMOC	75
Abb. 36:	Schematische Darstellung der AMOC als „Nordatlantischer Wärmekreislauf“	75
Abb. 37:	Wirkungsweise und Relevanz des „Subpolaren Wirbels“	76
Abb. 38:	„Subpolarer Wirbel“ erzeugt wichtige ozeanische Konvektion	77
Abb. 39:	Hohe CO ₂ -Konzentration im Nordwestatlantik bis in große Tiefen	78
Abb. 40:	Simulationsnachweis für abrupten Kollaps der AMOC („AMOC Tipping Point“)	81
Abb. 41:	Szenario einer massiven Abkühlung in Nordeuropa nach AMOC-Kollaps	82
Abb. 42:	Globale Verteilung tropischer Regenwälder	87
Abb. 43:	Verlust der globalen tropischen Regenwaldfläche (2002-2024)	88
Abb. 44:	Geographische Dimension des Amazonas-Regenwalds	89

Abb. 45:	Grundlegende Wirkungsweise des Wasserkreislaufs im Amazonas-Regenwald	91
Abb. 46:	Überregionale Feuchtigkeitsverteilung aus dem Amazonasgebiet	91
Abb. 47:	Deutliche Zunahme extremer „Superstürme“	100
Abb. 48:	Massive Aufnahme von Wärmeenergie durch die Ozeane	101
Abb. 49:	Deutlicher Anstieg der weltweiten Meerestemperaturen	102
Abb. 50:	Anhaltende Erwärmung der Ozeane – mit Schwerpunkt im Atlantik	103
Abb. 51:	Massive Erwärmung der Arktis verstärkt ozeanische Veränderung	104
Abb. 52:	Das Problem der ozeanischen Versauerung	105
Abb. 53:	Globale Verbreitung und zunehmende Gefährdung von Korallenriffen	107
Abb. 54:	Die wichtigsten Permafrostregionen der Nordhalbkugel	111
Abb. 55:	Komplexe Abläufe und Folgen des Auftauens von Permafrostböden	114
Abb. 56:	Freisetzung von Treibhausgasen in den polaren Permafrostregionen	116
Abb. 57:	Zentrale Einflussfaktoren und Wirkungsmechanismen bei Permafrostböden	119
Abb. 58:	Beschleunigtes Abschmelzen des Rhonegletschers	122
Abb. 59:	Jährlicher Masseverlust wichtiger globaler Gletscher	125
Abb. 60:	Gletscher-Gesamtmassenbilanz 1950-2024	125
Abb. 61:	Unterschiedliche Grundmuster der globalen Höhenströmungen (Jetstreams)	126
Abb. 62:	Arktische Erwärmung deformiert polare Jetstreams	127
Abb. 63:	Absehbarer Pfad der Erderwärmung je nach Emissionsprofil	130
Abb. 64:	Aktueller Verlauf der Treibhausgas-Emissionen und Abweichungen vom Klimaziel	131
Abb. 65:	Globales Emissionsprofil zunehmend geprägt durch China und Indien	132
Abb. 66:	Thermische Sensitivitäten wichtiger Klimakippelemente	134
Abb. 67:	Mögliche ökonomische Quantifizierung zukünftiger Klimaschäden	141
Abb. 68:	Das „DICE-Modell“ zur ökonomischen Bewertung von Klimapolitik und Klimaschäden	142
Abb. 69:	Deutliche Zunahme weltweiter Überflutungsrisiken	144
Abb. 70:	Klimarisiken dominieren zunehmend globale Risikoeinschätzungen	145
Abb. 71:	Weltweit steigende Kosten von Naturkatastrophen und Extremwetterereignissen	146
Abb. 72:	Steigende Schäden durch Naturkatastrophen und Extremwetterereignisse (USA)	147
Abb. 73:	Weckruf aus der Versicherungsindustrie	148
Abb. 74:	Trilemma des politischen und gesellschaftlichen Diskurses zum Klimawandel	156
Abb. 75:	Globale Temperatur- und Niederschlagsmuster bei Erderwärmung um 3 Grad	158
Abb. 76:	Umfassende und weitreichende Implikationen der Climate Tipping Points	160
Abb. 77:	Exponentielle Ausbreitung der Elektromobilität	162
Abb. 78:	Dynamisches Wachstum der Solarenergie	162
Abb. 79:	Weltweit zunehmende Relevanz erneuerbarer Energien	166
Abb. 80:	Massiv steigender Energiebedarf von KI-Rechenzentren	167
Abb. 81:	Kippdynamik und Rückkopplungen am Beispiel des Grönland-Eisschildes	175
Abb. 82:	Multiple Interdependenzen von Climate Tipping Points	176
Abb. 83:	Die wichtigsten Climate Tipping Points und ihre kritischen Temperaturgrenzen	177
Abb. 84:	Die wichtigsten Frühwarnsignale bei Climate Tipping Points	179

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Differenzierte Darstellung globaler Kippelemente	26
Tab. 2:	Zeitliche und thermische Kritikalität der wichtigsten Climate Tipping Points	135

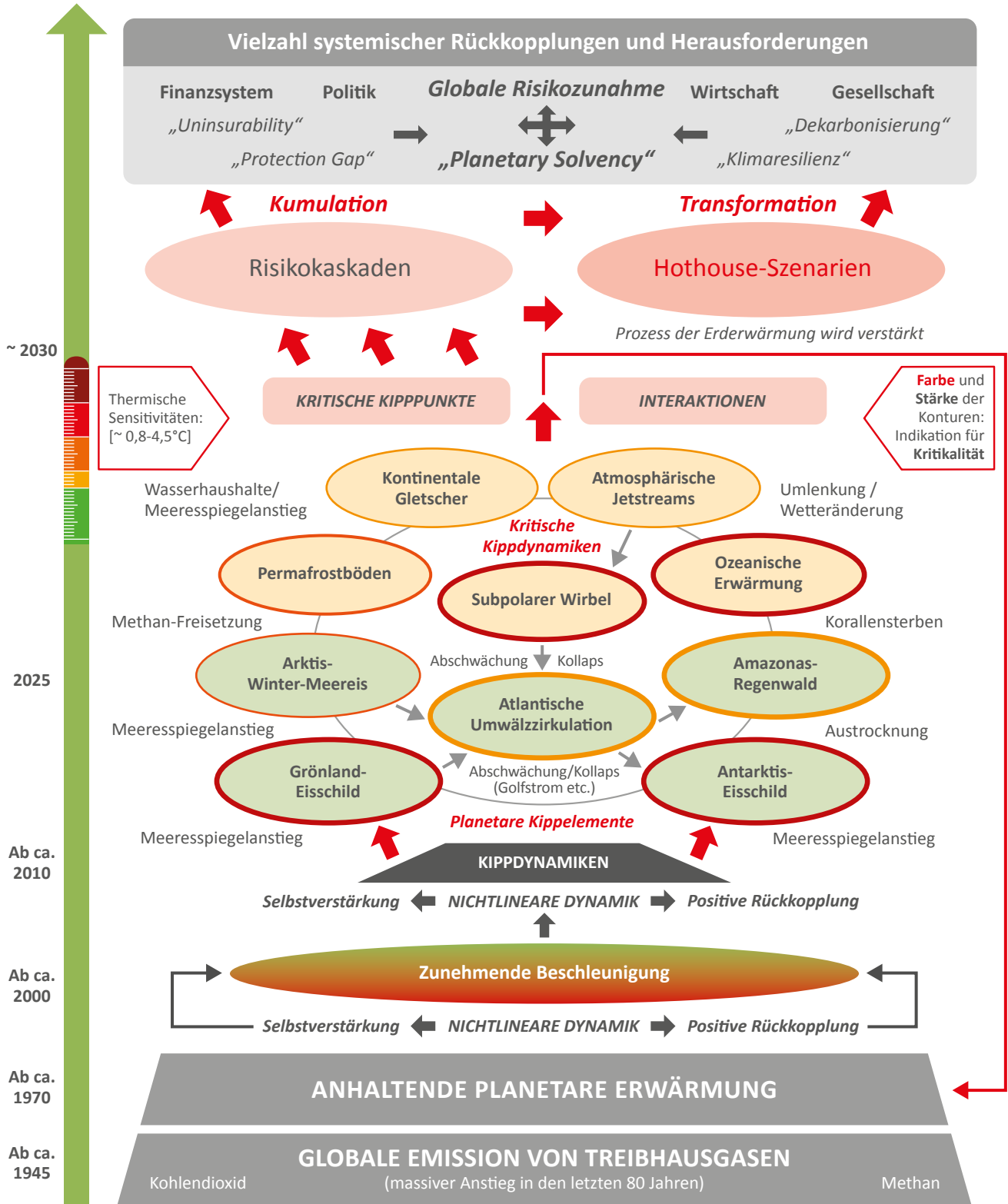
1 EXECUTIVE SUMMARY

- Der Planet Erde leidet unter einem Prozess **anhaltender Aufheizung**, bekannt als „**Treibhauseffekt**“, und hervorgerufen durch massive Emissionen von „**Treibhausgasen**“.
- Die **globale Erwärmung** hat 2024 zum **ersten Mal die 1,5°C-Marke überschritten**; ihr Trend entspricht derzeit einem **Pfad zu rund 2,7°C Erderwärmung** bis Ende des Jahrhunderts.
- Die „**Pariser Klimaziele**“ von 2015, die eine Begrenzung der Erderwärmung auf ein **Niveau von 1,5-2°C** anstreben, werden voraussichtlich bereits in einigen Jahren überschritten.
- Als Folge der Erderwärmung resultiert ein **einschneidender Wandel des planetaren Klimas**, der aber in der Gesamtheit seiner Ausprägungen oft noch **unterschätzt** wird; ein wichtiger Grund dafür liegt in der **inhärenten Trägheit** des globalen Klimasystems.
- Hinzu kommt, dass die Bedeutung globaler **Klimakippelemente** nicht immer hinreichend berücksichtigt wird: **Kippelemente** sind zentrale Bestandteile des globalen Klimasystems; sie weisen komplexe und oftmals selbstverstärkende „**Kippdynamiken**“ auf, die für die Entwicklung des planetaren Klimas von entscheidender Bedeutung sind.
- Kippelemente sind durch **Rückkopplungen** und **nicht-lineare Interdependenzen** geprägt; sie können nach Überschreiten kritischer **Schwellenwerte** „umkippen“ und dadurch starke (meist irreversible) **Veränderungen des Klimas** auslösen.
- Die **Schwellenwerte** für das Auslösen solcher Kippdynamiken gelten als „**Kippunkte**“; sie sind – direkt oder indirekt – vom Grad der planetaren Erwärmung abhängig und definieren das Phänomen der „**Climate Tipping Points**“.
- Die zentrale Eigenschaft der *Climate Tipping Points* besteht darin, dass der zugrundeliegende Prozess (*Kippdynamik*) nach Überschreiten des jeweiligen Kippunkts **progressiv weiterläuft** und in der Regel **unumkehrbar** ist.
- Die Mehrzahl der globalen Kippelemente ist durch **systemische Interaktionen** verbunden, wodurch sich einzelne Kippdynamiken gegenseitig und kumulativ verstärken; dies kann zu einem progressiven „**Aufschaukeln**“ und zur Auslösung **planetarer Kippkaskaden** führen.
- Als derzeit bedeutendste Kippelemente gelten die **Eisschilde** von Grönland und der Antarktis, der **Amazonas-Regenwald** sowie wichtige **Strömungssysteme** im Atlantik (*AMOC; SPG*).
- Hinzu kommen weitere globale und regionale Kippdynamiken, die mit der Erwärmung der **Ozeane**, dem Auftauen von **Permafrostböden**, der fortschreitenden **Gletscherschmelze**, sowie Veränderungen atmosphärischer **Höhenströmungen** (*Jetstreams*) zusammenhängen.
- Neuere Erkenntnisse der Klimaforschung belegen, dass wichtige Kippdynamiken bereits bei einer globalen Erwärmung von **1,0°C** in Gang gesetzt werden können – dies gilt insbesondere für das **Abschmelzen der Eisschilde** auf Grönland und der Westantarktis.
- Speziell die polaren Schmelzprozesse zeigen **starke interne Rückkopplungseffekte** (u.a. *Eis-Albedo-Effekt, Melt-Elevation-Effekt, MISI-Effekt*), die nach Auslösen der Kippdynamik eine **progressive Kettenreaktion** in Gang setzen und laufend verstärken.
- Folgen der polaren Eisschmelze sind ein (deutlicher) Anstieg des globalen **Meeresspiegels**, eine Verstärkung der globalen **Erwärmung** sowie eine Abschwächung der **Atlantischen Umwälzzirkulation** (*AMOC*) – alle diese Effekte haben **weitere Rückwirkungen** auf andere Klimakippelemente und können diese verstärken und beschleunigen.
- Eine **AMOC-Abschwächung** ist bereits klar bestätigt und könnte bei progressivem Verlauf das Klima in Europa massiv verändern („**Golfstrom-Kollaps**“); eine zentrale Rolle spielt dabei der **Subpolare Wirbel** (*Subpolar Gyre/SPG*).

- Der **SPG** ist eine essentielle ozeanische Umwälzung und wirkt als „Motor“ der **AMOC**; sein mutmaßlicher **Kippunkt** liegt bei rund **1,1-3,8°C** Erderwärmung – die **Kippdynamik** des **SPG** könnte somit bereits angelaufen sein (►„**AMOC-Abschwächung**“).
- Der **Amazonas-Regenwald** ist als riesige **CO₂-Senke** und gigantisches **Feuchtigkeits-Verteilungssystem** ebenfalls ein kritisches Kippelement für das planetare Klima; sein wahrscheinlicher Kippunkt liegt im Bereich von **3,0-5,0°C** der Erderwärmung.
- Das **Amazonas-Ökosystem** leidet besonders stark unter menschlichen Eingriffen (Abholzung, Brandrodung, Viehzucht, Bergbau etc.); durch anhaltende Abholzung könnte sein Kippunkt sogar deutlich absinken auf lediglich **1,5-2,0°C!**
- Die Amazonas-Region zeigt bereits eine stark erhöhte Fragilität und wandelt sich mit hoher Dynamik zum **Netto-Emittenten von CO₂**; als Risikoszenario droht **Austrocknung** („**Dieback**“) – mit äußerst **schwerwiegenden Folgen** für Biodiversität und das planetare Klima.
- Auch die **Ozeane** spielen für die Dynamik des planetaren Klimas eine sehr wichtige Rolle; sie haben bislang rund 50% der weltweiten Treibhausgasemissionen und mehr als 90% der planetaren Erwärmung absorbiert und erfüllen so eine wichtige Funktion als „**Klimapuffer**“.
- Trotz starker Aufheizung gelten die Ozeane bislang nicht generell als kritisches Kippelement; sie stehen aber für eine **Vielzahl kritischer Einflussfaktoren und Rückkopplungen** auf das gesamte Klimasystem und wirken so auch auf andere Kippelemente und -dynamiken.
- Neben ihrer **Erwärmung** spielt die zunehmende **Übersauerung** der Ozeane (als Folge intensiver CO₂-Absorption) eine wichtige Rolle – beide Effekte sind verantwortlich für das großräumige Absterben tropischer **Korallenriffe** („**Korallenbleiche**“).
- **Permafrostböden** der nördlichen Hemisphäre repräsentieren ebenfalls eine Kippdynamik: Mit zunehmender Erderwärmung (**ab etwa 1,0-2,3°C**) werden dort große Mengen gebundener Treibhausgase freigesetzt (insbesondere **Methan**), was die globale Erwärmung verstärkt und so das eigene Abtauen beschleunigt (**Rückkopplung**).
- Auch kontinentale **Gletschersysteme** durchlaufen einen Prozess des beschleunigten Abschmelzens, was in den Alpen bereits zu einer Halbierung der Eismassen geführt hat; in der **Hindukusch-Himalaya-Region** drohen durch Gletscherschmelze längerfristig starke Verwerfungen regionaler **Wasserhaushalte** und **Wirtschaftssysteme**.
- Als direkte Folge der Erderwärmung resultieren **Deformationen polarer Höhenströmungen** (*Jetstreams*), die regionale Klimasysteme spürbar verändern und speziell in Europa und Nordamerika vermehrt zu **Extremwetterereignissen** führen.
- Auf Grundlage derzeitiger politischer und wirtschaftlicher Weichenstellungen ist von einer weiteren – und vorerst ungebremsten – **Erderwärmung** auszugehen, was zu einer **Beschleunigung und Intensivierung** der schon heute erkennbaren **Kippdynamiken** führt.
- Ein wichtiger Unsicherheitsfaktor liegt im (möglichen) Ausmaß **systemischer Rückkopplungs- und Verstärkungseffekte**, die zu weitaus schnelleren und **stärkeren Veränderungen** des Erdsystems sowie des planetaren Klimas führen könnten, als bislang gedacht.
- Auffallend ist in diesem Kontext das häufig wiederkehrende **Element des „Unterschätzens“** adverser Klimaveränderungen, das in vielen Analysen zum Ausdruck kommt; dieser Befund deutet sehr klar auf ein noch immer **unzureichendes Verständnis der Komplexität sowie der vielfältigen Interaktionen und Nichtlinearitäten des planetaren Klimasystems!**
- Durch **verbesserte („komplexere“)** Klimamodelle sowie Einsatz neuer „**Supercomputer**“ (z.B. **JUPITER**) lassen sich bisherige Erkenntnisdefizite künftig zumindest teilweise überwinden.
- Eine **direkte Folge des systematischen Unterschätzens** bereits ablaufender (massiver) Klimaveränderungen liegt darin, dass auch die **klimapolitische Reaktionsfunktion** der Weltgemeinschaft seit Jahren zu zögerlich, zu wirkungsarm und zu inkonsequent ausfällt.
- Der aktuelle Stand weltweit zugesagter Maßnahmen zum Klimaschutz bleibt deutlich hinter den „**Pariser Klimazielen**“ zurück; dieser Aspekt bedeutet, dass sich das Weltklima vorerst klar auf einem **Pfad hin zu 2,7°C Erwärmung** bewegt!

- Obwohl weltweit bereits bedeutende Schritte hin zu klimaneutraler Energieerzeugung und gezielter Emissionsreduktion unternommen wurden, ist das **resultierende Gesamtbild** aus heutiger Sicht dennoch: „**zu wenig – zu langsam – zu spät**“.
- Das absehbare Überschreiten der „*Pariser Klimaziele*“ von 1,5-2,0°C rückt eine **größere Anzahl globaler Klimakippunkte** in den Bereich der Realität; gleichzeitig steigt das Risiko eines **Auslösens interdependenter Kippkaskaden!**
- Solche **Kippkaskaden** hätten – durch **Kumulation** und gegenseitige **Verstärkung** adverser Effekte – gravierende Konsequenzen für planetare Umwelt- und Lebensbedingungen; sie gelten aber in der Mehrzahl heutiger Klimamodelle noch als „*relativ unwahrscheinlich*“.
- Diese **asymmetrische Risikowahrnehmung** ändert sich jedoch zunehmend: Unter Berücksichtigung von **Kippkaskaden** werden bislang als „*high impact – low probability*“ eingestufte Klimaveränderungen zu „*high impact – high probability*“-Ereignissen!
- Die Zunahme extremer Wetterereignisse und hoher Klimaschäden auf einem Pfad zu 2,7°C Erwärmung erzwingt auch in zentralen Bereichen des Finanzsystems **einschneidende Konsequenzen**: Die Stichworte lauten „*Uninsurability*“ und „*Protection Gap*“.
- Vor dem Hintergrund **rapide anwachsender Klimaschäden** fordern Aufsichts- und Regulierungsbehörden von Banken und anderen Finanzmarktteilnehmern eine **verschärfte Erfassung und Überwachung** „*physischer Risiken*“ des Klimawandels.
- Unter dem Stichwort „*Planetary Solvency*“ werden dazu **spezielle Risikometriken** entwickelt; Ziel ist vor allem eine **verbesserte Vorsorge gegen materielle Risiken des Klimawandels**.
- Zusätzlich muss jedoch auch die **systemische Resilienz** gegen ansteigende Kosten und Folgewirkungen des Klimawandels verstärkt werden. Ein wichtiger Ansatzpunkt dazu sind „**positive Kippdynamiken**“, etwa durch globale Skalierung erneuerbarer Energien.
- Gleichzeitig müssen die Möglichkeiten und Auswirkungen eines nur temporären „Überschießens“ über die kritische Grenze von 1,5-2,0°C („**Overshoot**“) laufend analysiert und realistische „Rückkehroptionen“ überprüft werden. (Erforderlich wäre dafür eine **massive nachträgliche Entnahme von CO₂** aus der Atmosphäre!).
- Steigende Klimarisiken könnten zukünftig **gezielte Eingriffe in das Klimasystem** nach sich ziehen („**Climate Engineering**“/„**Geoengineering**“); der Erfolg solcher Maßnahmen scheint derzeit aber zweifelhaft und mit erheblichen **Neben- und Folgewirkungen** behaftet.
- Weiterhin unerlässlich (und relativ alternativlos) ist somit die **konsequente Reduktion von Treibhausgasemissionen**. Sinnvoll wären zudem ein **verstärktes Monitoring kritischer Climate Tipping Points** sowie der gezielte **Aufbau entsprechender Frühwarnsysteme**.
- Auch Unternehmer, Investoren und Vermögensinhaber sollten diese Zusammenhänge sehr genau zur Kenntnis nehmen: Eine anhaltende **Neubewertung physischer Klimarisiken**, verstärkt durch realistischere Modellierung von *Climate Tipping Points* und *Kippkaskaden*, hätte **gravierende Folgen für weite Teile des Finanzsystems** (►„**Repricing of Risk**“)!
- Folglich dürften nicht nur die **materiellen Kosten physischer Klimarisiken** künftig deutlich zunehmen, sondern auch das Ausmaß **direkter Rückwirkungen auf Kapitalmärkte und die bestehende Finanzarchitektur!**

COGNITIVE CONCLUSION
 Climate Tipping Points
 Das Umkippen essentieller Klimasysteme als globales Risiko



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025

2 EINFÜHRUNG UND HINTERGRUND

Seit Jahren bestimmt die Diskussion um den menschengemachten Klimawandel große Teile des weltweiten politischen und gesellschaftlichen Diskurses. Zwar leidet dieser Diskurs in Teilen unter wissenschaftlichen Unschärfen und Ambiguitäten, dennoch muss die grundsätzliche Richtigkeit der Ausgangsthese – *menschliches Handeln hat den globalen Klimawandel in den letzten rund 100 Jahren ausgelöst und massiv beschleunigt* – als hinreichend gesichert gelten. In der nachfolgenden Analyse wird diese Ausgangsthese deshalb durchgängig zugrunde gelegt.

Infolgedessen gilt im Rahmen dieser Analyse als wissenschaftlich belegt, dass:

- der Planet Erde sich in den letzten Jahrzehnten **zunehmend erwärmt**
- das Phänomen der globalen Erwärmung mit **menschlichen Aktivitäten** stark korreliert
- der Schwerpunkt dieser Aktivitäten im sogenannten **Industriellen Zeitalter** liegt
- diese Phase durch **Verbrennung von Kohlenwasserstoffen** stark geprägt ist (Kohle, Öl, Gas)
- das Industrielle Zeitalter folglich mit einem **massiven Ausstoß von Kohlendioxid** einhergeht
- die Anreicherung der Atmosphäre mit „**Treibhausgasen**“ die **planetare Erwärmung** antreibt
- der Prozess der Erderwärmung wichtige **Grundmechanismen des globalen Klimas** verändert.

In Kurzform: Der seit rund 100 Jahren massiv ansteigende Ausstoß klimaschädlicher „**Treibhausgase**“ – insbesondere Kohlendioxid und Methan – bewirkt eine **Dynamik globaler Erwärmung und massiver klimatischer Veränderungen**, die sich progressiv zu beschleunigen scheint.

- ▶ Genau diese Dynamik steht als wichtigster Treiber im Zentrum des Klimawandels.
- ▶ Sie bedingt kausal die **sogenannten „Climate Tipping Points“**, deren grundsätzliche Eigenschaften, Wirkungsweisen und Risiken im Rahmen dieser Analyse ausführlich untersucht und erörtert werden.



Ein Kipppunkt in einem System ist ein Punkt, an dem kein Zurück mehr möglich ist. Wird dieser Punkt erreicht, können selbst kleine Änderungen drastische und nicht umkehrbare Veränderungen im Verhalten des Systems bewirken.

CCCA (2024, Kipppunkte)



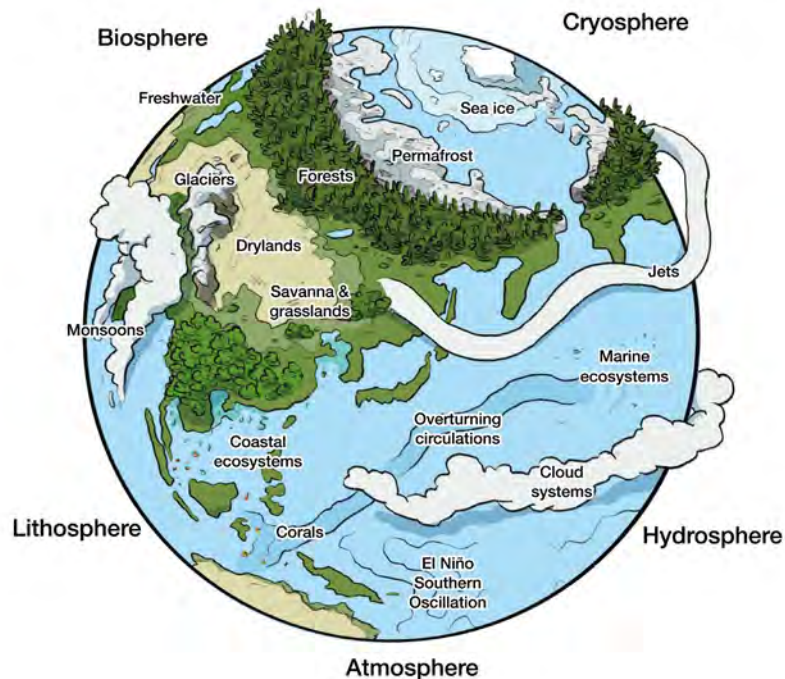
Um die **grundlegende Komplexität des globalen Klimasystems** und das oftmals nichtlineare – und nicht immer vollständig erforschte! – Zusammenwirken dessen wichtigster Kernelemente verstehen und sinnvoll einordnen zu können, ist prinzipiell ein **ganzheitliches Verständnis** der unterschiedlichen „planetaren Sphären“ erforderlich, aus dem sich elementare Zusammenhänge, Interaktionen und „Querverbindungen“ zwischen relevanten Klimatelementen ableiten lassen (vgl. dazu Abb. 1).

- ▶ Dieser Ansatz folgt dem Verständnis planetarer Wirkungsketten im Sinne eines komplexen, dynamischen und permanent auf vielen Ebenen interagierenden „**Erdsystems**“.¹

Als „**Klimakipppunkte**“ oder „**Climate Tipping Points**“ werden Phänomene innerhalb des globalen Klimasystems bezeichnet, bei denen das Überschreiten kritischer Schwellenwerte abrupte, oftmals drastische und meist stark beschleunigte Veränderungen auslöst. In der Regel handelt es sich dabei um **dynamische nichtlineare Prozesse**, durch die ein vorher stabiles System in einen neuen und deutlich fragileren Zustand „kippt“. Die entsprechende Systemveränderung ist meist irreversibel.

¹ Vgl. dazu ausführlich etwa die Systematik der *Global Tipping Points*-Analysen von: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), aber auch die Ausgestaltung wichtiger Forschungsbereiche für „*Erdsystemanalyse*“, etwa beim *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)* oder am neu errichteten *Fachbereich C³S* der *Goethe-Universität Frankfurt*.

Abb. 1: Globales Klimasystem als Interaktion vielfältiger Sphären des Erdsystems



Quelle: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); Bildnachweis: Sina Loriani

Bei der Erforschung der derzeitigen Erderwärmung sowie deren Auswirkungen auf das Erdsystem erweist sich seit vielen Jahren das Problem der Treibhausgase – also dessen direkter Beitrag zum „Treibhauseffekt“ („greenhouse effect“) – als absolut zentraler und bestimmender Faktor.

Die Erkenntnis, dass ein vermehrter Ausstoß von kohlenstoffreichen Treibhausgasen den Prozess der Erderwärmung maßgeblich bewirkt und zuletzt zunehmend beschleunigt, steht deshalb hinter den wichtigsten weltweiten Vereinbarungen zum Klimaschutz. Doch auch das Prinzip der „Climate Tipping Points“ prägt – als implizite Restriktion – die Fachdiskussion:

- So fordert das grundlegende „Pariser Klimaabkommen“ von 2015, dem seinerzeit 197 Länder beigetreten sind, eine Begrenzung der globalen Erwärmung „möglichst“ auf einen **Höchstwert von 1,5°C** gegenüber dem Niveau des vorindustriellen Zeitalters.²

Die explizite Vereinbarung eines solchen Schwellenwertes reflektiert nicht nur die Tatsache, dass eine erhöhte Durchschnittstemperatur erhebliche Härten für Mensch und Natur bedeuten würde, sondern ist zugleich auch Beleg für die **fundamentale Relevanz wichtiger Klimakippunkte** – die bei einem solchen (relativ gering erscheinenden) Temperaturanstieg vermehrt ausgelöst würden.³

Zu diesem wichtigen Aspekt – sowie dem kausalen Zusammenhang zum Gegenstand dieser Analyse – erklärt der Klimaexperte und Erdsystemforscher **Nico Wunderling**:

„Die Stabilität der Kippelemente im Erdsystem hängt entscheidend davon ab, ob die Pariser Klimaziele eingehalten werden. Jenseits der 1,5- oder gar 2-Grad-Marke geraten wir in eine Hochrisikozone, in der unumkehrbare Klimakippunkte ausgelöst werden können.“⁴

² „Das Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015 (...) erklärt eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf weit unter zwei Grad Celsius als Ziel, nach Möglichkeit auf 1,5 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit.“ World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 39. Vgl. dazu ausführlich auch: Umweltbundesamt (2024, Übereinkommen); sowie: Umweltbundesamt (2025, 1,5-Grad-Ziel).

³ Vgl. dazu ausführlich: unten, in nachfolgenden Ausführungen und Kapiteln.

⁴ Wunderling (2025, Hochrisikozone).

- ▶ Eine zentrale Stoßrichtung der aktuellen Klimaschutzdiskussion ist somit, durch **Begrenzung der weiteren Erderwärmung** möglichst auch das Überschreiten kritischer Schwellen und Kippunkte im globalen Klimasystem zu verhindern.
- ▶ Sämtliche Reduktions- und Transformationsmaßnahmen, die derzeit unter dem Stichwort „Green Transition“ in zahlreichen Wirtschafts-, Ernährungs- und Energiesystemen der Welt stattfinden, folgen letztlich dieser Zielsetzung.⁵

Dahinter steht eine **fundamentale Einsicht** in das Grundprinzip und die komplexe Dynamik typischer Klimakippelemente:

- ▶ „Sie alle haben gemeinsam, dass sie sich durch vergleichsweise geringe äußere Einflüsse ab einem Schwellenwert – dem Kippunkt – abrupt und in menschlichen Zeitskalen unumkehrbar verändern.“⁶

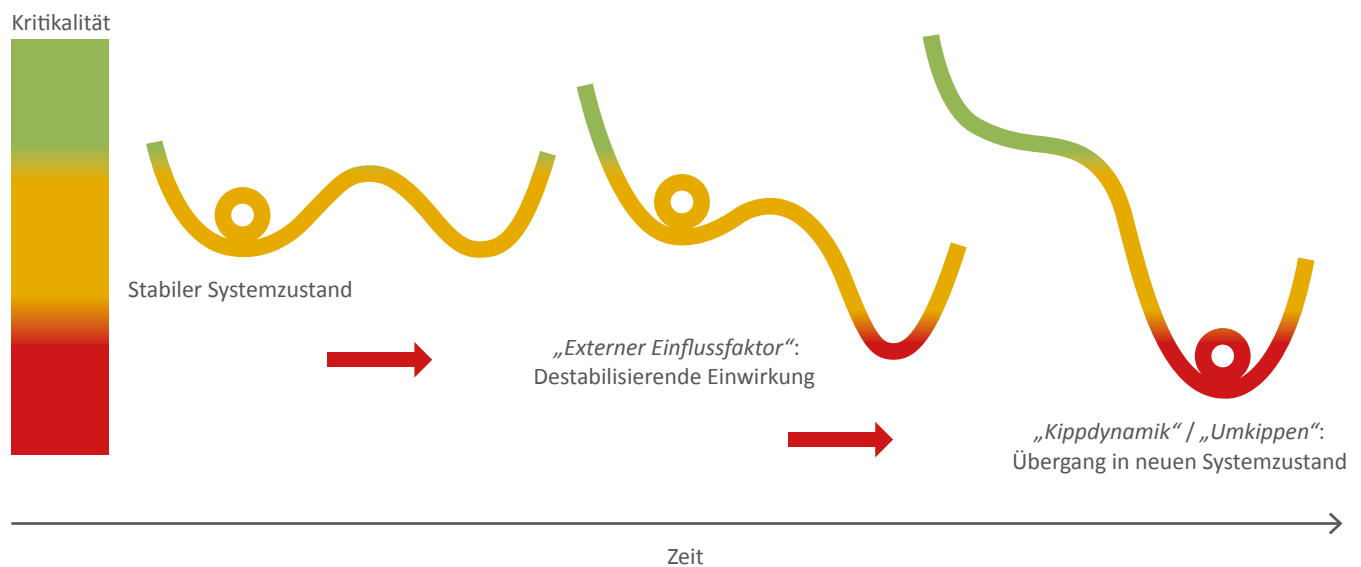
Abb. 2 verdeutlicht schematisch die **Wirkungsweise systemischer Kippunkte**, die in der Realität des globalen Klimasystems allerdings wesentlich komplexer und unter Einwirkung zahlreicher weiterer Einflussfaktoren und Interdependenzen ablaufen.⁷

Als **Green Transition** wird allgemein das Bestreben definiert, durch Umstellung der Energieerzeugung wichtiger industrieller Prozesse sowie der Mobilität in Richtung erneuerbarer Energien den weltweiten Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgasemissionen nachhaltig zu reduzieren.

Hier zeigt sich allerdings ein erstes wichtiges **Spannungsverhältnis**: Obwohl die enorme Wichtigkeit der *Climate Tipping Points* in der Fachwelt unumstritten ist, scheint deren öffentliche Wahrnehmung noch deutlich unterentwickelt. Und dies, obwohl das Phänomen der Klimakippunkte für die planetare Zukunftssicherung größte Relevanz hat!⁸

Hinzu kommt noch ein **zweites Spannungsverhältnis**: In jüngerer Zeit nehmen vermehrt Zweifel an der Bedeutung – und oft sogar der Realität – des globalen Klimawandels zu.

Abb. 2: Grundsätzliche Wirkungsweise systemischer Kippelemente und Kippunkte



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung; in Anlehnung an University of Exeter, Global Tipping Points (Report, 2023)

⁵ Vgl. dazu etwa grundlegend: „Assessment Reports“ und Abschlussberichte des Weltklimarates, z.B. IPCC (2023, Report).

⁶ Klimareporter (2024, Kippunkt).

⁷ Vgl. dazu ausführlich: unten, nachfolgende Kapitel (insbesondere 4-5).

⁸ Vgl. dazu ausführlich: unten, Kap. 3 (zum aktuellen Stand der Wissenschaft) bzw. Kap. 6 (zu den weitreichenden Folgen der Climate Tipping Points).

In zahlreichen Ländern führt dies, speziell im politisch und sozial aufgeheizten Spektrum, zu gezielter Agitation und populistisch gefärbter Ablehnung jeglicher Klimaschutzmaßnahmen:

- ▶ Exemplarisch hierfür ist die Position der neuen US-Regierung („Trump 2.0“), die nicht nur umgehend aus dem *Pariser Klimaabkommen* ausgetreten ist, sondern auch zahlreiche nationale Maßnahmen für Klimaschutz beendet oder rückgängig gemacht hat.⁹

Vor diesem Hintergrund erscheint es nicht nur überaus wichtig, sondern es ist auch von **allergrößter Dringlichkeit**, das Bewusstsein für die unerbittliche Dynamik der *Climate Tipping Points* zu schärfen und die absehbar stärksten globalen Auswirkungen relevanter Kippmechanismen zu analysieren:

- ▶ Die Skala reicht hier vom beschleunigten Abschmelzen der Polkappen, mit der Folge eines starken Anstiegs des Meeresspiegels, über weitreichende Veränderungen elementarer Luft- und Meeresströmungen bis hin zu einem möglichen Stillstand oder sogar einer Umkehrung des Golfstroms – um nur eine kleine Anzahl an Beispielen zu nennen.¹⁰

Eine übersichtliche Darstellung des Phänomens der *Climate Tipping Points* sowie eine Diskussion möglicher Auswirkungen findet sich in nachfolgendem Video der *Initiative D2030* unter Mitwirkung des Erdsystemforschers *Prof. Dr. Nico Wunderling*. Hier geht's direkt zum Video:



Unter Bezugnahme auf neueste Forschungsergebnisse führender Klimawissenschaftler versucht die Analyse deshalb, ein möglichst exaktes Bild der aktuellen **Dynamik globaler Klimakippunkte** zu zeichnen, einen umfassenden Überblick über noch mögliche Schutz- oder Gegenmaßnahmen zu geben sowie die wichtigsten Risiken und möglichen Konsequenzen eines baldigen „Umkippen“ wichtiger Elemente des Klimasystems zu erörtern.

Folgende drei Punkte sind dabei von allergrößter Wichtigkeit:

- „Der menschengemachte Klimawandel kann zu einer **Destabilisierung von großräumigen Bestandteilen des Erdsystems** wie Eisschilden, oder Mustern von Luft- und Ozeanströmungen führen – den sogenannten Kippelementen. Zwar kippen diese Elemente nicht über Nacht, doch es werden **fundamentale Prozesse** in Gang gesetzt, die sich über **Jahrzehnte, Jahrhunderte oder Jahrtausende vollziehen**.“¹¹
- „Die derzeitige Klimapolitik birgt ein **hohes Risiko für das Kippen kritischer Elemente des Erdsystems**, selbst wenn die globale Erwärmung nach einer Periode der Überschreitung der 1,5 Grad-Grenze wieder auf unter 1,5 Grad beschränkt wird.“¹²
- „Das Klimasystem reagiert träge auf die menschengemachten Veränderungen. Damit besteht die Gefahr, dass bestimmte Entwicklungen **schon heute irreversibel** sind.“¹³

Vor dem Hintergrund der deutlich erkennbaren Brisanz, Aktualität und elementaren Wichtigkeit dieser Zusammenhänge ist es wenig überraschend, dass im nächsten Bericht des *Weltklimarats IPCC* (AR7, voraussichtlich ab 2027) dem **Komplex der Klimakippunkte** ein eigenes Kapitel gewidmet wird.¹⁴

⁹ Vgl. dazu überblickartig etwa: ntv (2025, USA); ntv (2025, Klimabericht); sowie weiterführend: Blyth/Driscoll (2025, Dekarbonisierung). Zu den Zielen der *Trump*-Regierung hat das *FERI Cognitive Finance Institute* bereits 2024 eine ausführliche Analyse veröffentlicht; der spätere Ausstieg der USA aus zentralen Klimaschutzbemühungen wurde darin klar prognostiziert; vgl. dazu: Rapp (2024, Trump).

¹⁰ Vgl. dazu ausführlich: unten, Kap. 5.2 - 5.8.

¹¹ *Annika E. Högner*, Klimaforscherin beim *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)* sowie dem *IIASA-Institute*, anlässlich der Vorstellung einer ausführlichen Studie zu den wachsenden Risiken eines „Umkippen“ wichtiger Klimakippelemente; zitiert nach: Goethe-Universität Frankfurt (2024, Kipp-Risiken); (Hervorhebungen durch Verfasser), und unter Einbeziehung der Originalstudie: Möller et al. (2024, Tipping Risks).

¹² Goethe-Universität Frankfurt (2024, Kipp-Risiken), unter Verweis auf die ausführliche Studie von: Möller et al. (2024, Tipping Risks); (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹³ *World Ocean Review* (2010, Weltmeere), S. 25; (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹⁴ Vgl. dazu die Vorabmeldungen unter: IPCC (2025, Report).

3 AKTUELLER STAND DER WISSENSCHAFT

3.1 Ausgangslage und Problemdimension

3.1.1 Globale Erwärmung und Treibhauseffekt

Seit mehr als 75 Jahren ist der Menschheit bekannt, dass der Planet Erde sich zunehmend erhitzt:

- ▶ „Die Menschheit weiß seit Jahrzehnten, dass sie das Klima der Erde durch den Ausstoß von Treibhausgasen erwärmt.“¹⁵

Als Hauptursache dafür gelten in der Klimawissenschaft übereinstimmend die seit Jahrzehnten massiv zunehmenden Emissionen sogenannter *Treibhausgase*, darunter insbesondere Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄). Diese *Treibhausgase* reichern sich in der erdnahen Atmosphäre stark an und erzeugen (bzw. verstärken) dadurch eine **einseitig abschirmende Wirkung**, auch bekannt als *Treibhauseffekt* („Greenhouse Effect“):

- ▶ Die Atmosphäre bleibt dadurch zwar weiter durchlässig für den Einfall von Sonnenlicht, gleichzeitig wird aber ein Teil der Wärmestrahlung absorbiert und an die Erde abgegeben.

Wie Abb. 3 deutlich zeigt, hat die Konzentration von CO₂ in der Erdatmosphäre in den zurückliegenden wenigen Jahrzehnten weitaus stärker zugenommen als jemals zuvor in der bekannten Erdgeschichte – mit massiven und klar negativen Konsequenzen für das Erdklimasystem.¹⁶

Laufende Messungen der CO₂-Konzentration ergeben „Rekordwerte – jedes Jahr“, und im Mai 2023 ermittelte eine Messstation auf Hawaii „die höchste bislang gemessene Kohlendioxidkonzentration der zurückliegenden zwei Millionen Jahre“.¹⁷

Die Wirkungsweise des **Treibhauseffekts** lässt sich wie folgt erklären:

„Nach Angaben des Weltklimarates kann die globale Erwärmung der zurückliegenden 120 bis 170 Jahre eindeutig auf vom Menschen freigesetzte **Treibhausgase** zurückgeführt werden. Zu diesen zählen in erster Linie Kohlendioxid, Methan (...) sowie weitere Chemikalien. Angereichert in der Atmosphäre bewirken diese Treibhausgase, dass unser Planet Erde zunehmend weniger Wärmeenergie in das Weltall abstrahlen kann. Die Wärme verbleibt stattdessen in der Erdatmosphäre und heizt zunächst deren Luftmassen, später auch den Ozean auf. Das physikalische Prinzip dahinter ist dasselbe wie in einem Gartengewächshaus. Aus diesem Grund werden die physikalischen Auswirkungen steigender Treibhausgaskonzentrationen auch als **Treibhauseffekt** bezeichnet.“¹⁸

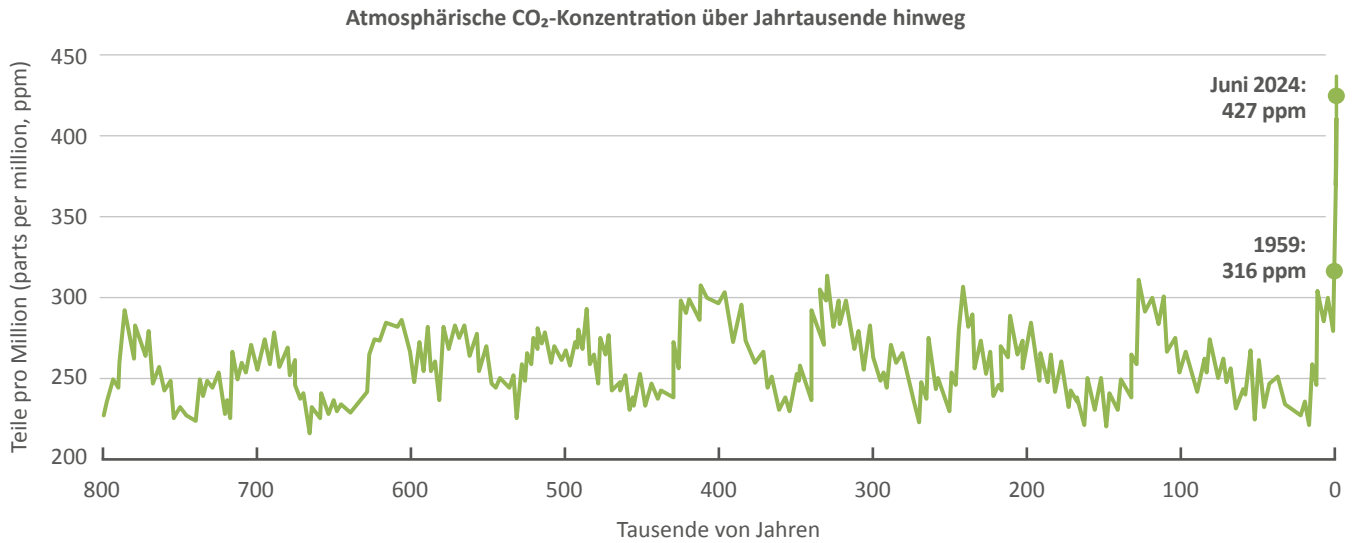
¹⁵ World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 34. Vgl. zur historischen Entwicklung der Klimaforschung sowie den ersten Nachweisen für menschengemachte Treibhauseffekte den Überblick bei: ZDF heute (2021, Klimawandel). Erste Hinweise auf eine mögliche Erderwärmung fand bereits im Jahr 1896 der schwedische Chemiker *Svante Arrhenius*.

¹⁶ Vgl. dazu anschaulich: scinexx.de (2025, Weltklima); ausführlich dazu auch: Forster et al. (2025, Indicators).

¹⁷ Vgl. dazu ausführlich: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 38 (dort auch die Zitate).

¹⁸ World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 34; (Hervorhebungen durch Verfasser).

Abb. 3: Rekordhohe Konzentration von Kohlendioxid in der Erdatmosphäre



Quelle: WEF (2024, Inaction), S. 6

„In 2023, the atmospheric concentration of carbon dioxide, as well as those of methane and nitrous oxide, reached the highest levels in the last 800 000 years.“¹⁹

Hauptverantwortlich für diesen alarmierenden Zustand sind die seit Jahrzehnten stetig **ansteigenden Treibhausgasemissionen**, die sich – als Folge verstärkter Industrialisierung und durch den Auf- und Ausbau kohlenstoffintensiver Verbrennungsprozesse in Kraftwerken, Fabriken sowie im Transport- und Mobilitätssektor – in den letzten rund 80 Jahren massiv erhöht haben (vgl. dazu Abb. 4, S. 14).²⁰



Der Klimawandel ist menschengemacht und eindeutig auf den ungebremsten Ausstoß von Treibhausgasen zurückzuführen.

World Ocean Review (2024, Klimakrise)



Daraus resultiert eine sehr klare Erkenntnis, die von einer überwältigenden Mehrheit der Klimaforscher nicht nur geteilt, sondern auch ständig mit neuen Belegen fundiert wird:

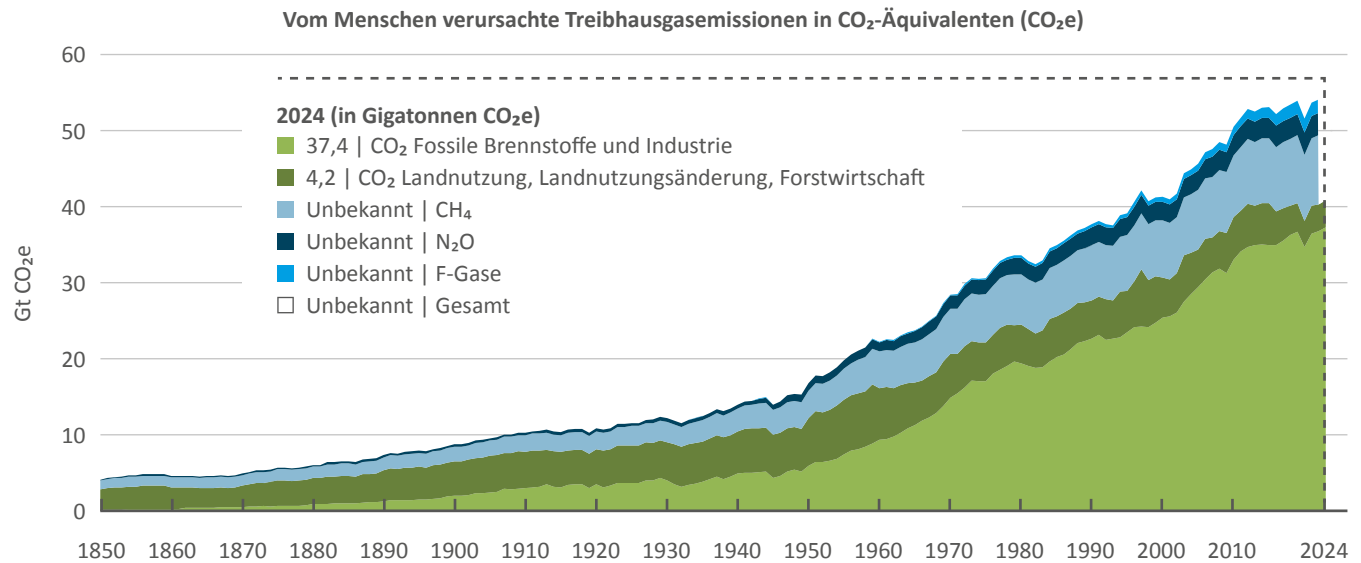
► „Der Klimawandel ist menschengemacht und eindeutig auf den ungebremsten Ausstoß von Treibhausgasen zurückzuführen.“²¹

¹⁹ WMO (2025, Climate), S. 1.

²⁰ Vgl. dazu: Climate Change Tracker (2025, Emissions); sowie grundlegend: IPCC (2025, Reports). Mit detaillierten Angaben auch: UNEP (2024, Gap); sowie: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 34-36.

²¹ World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 34.

Abb. 4: Deutliche Zunahme globaler Treibhausgasemissionen in den letzten Jahrzehnten



Quelle: Climate Change Tracker (2025, Emissions)

3.1.2 Das Problem der Treibhausgase

Während das Treibhausgas CO₂ insbesondere bei der industriellen oder häuslichen Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas freigesetzt wird, entstehen **Methan-Emissionen** vielfach auf natürlichem oder indirektem Wege – etwa durch Aufstieg aus Mooren und zunehmend **auftauenden Permafrostböden**, als Begleiteffekt bei der Förderung von Erdgas sowie – und insbesondere – auch als Folge intensiver Massentierhaltung.²²

Große **Tierherden** (insbesondere Rinder), die zur Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung in zunehmendem Ausmaß gehalten werden, gelten inzwischen mit einem **Anteil zwischen 30 und 35%** als einer der wichtigsten Emittenten klimaschädlicher Treibhausgase.²³

- Dieser Aspekt ist wichtig, da Methan aus Sicht der Klimaforschung um **mehr als das Dreißigfache schädlicher** für die Atmosphäre ist als CO₂²⁴

Methan gelangt seit einigen Jahren immer stärker in die Atmosphäre – nicht zuletzt durch die globale Ausweitung von Viehherden, aber offenbar auch bereits durch das Auftauen von Permafrostböden. Aktuell hat sich der Methangehalt im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter um **rund 162%** erhöht. Aus Sicht der Klimaforschung alarmierend:

- „So hoch war die Methankonzentration in den zurückliegenden 800 000 Jahren nicht.“²⁵

²² Vgl. dazu: Climate Change Tracker (2025, Methane). Auch der weltweite (Nass-)Reisanbau gilt als Quelle verstärkter Methanemissionen und könnte für bis zu 25% des weltweiten Methanausstoßes verantwortlich sein; vgl. dazu etwa: Pflanzenforschung (2010, Reis); Statista (2024, Reis); sowie sehr detailliert auch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 38-39. Zum Aspekt der Methanfreisetzung aus Permafrostböden vgl. ausführlich: unten, Kap. 5.6.

²³ Der daraus resultierende Methanausstoß wird 2024 auf rund 120 Mio. t veranschlagt; Viehzucht ist damit eine ähnlich große Methanquelle wie der gesamte Öl- und Gassektor; vgl. dazu ausführlich etwa: CATF (2024, Methane). Aus den Daten des *Climate Change Trackers* resultiert für das Jahr 2023 ein rechnerischer Anteil von 34,7%; vgl. dazu: Climate Change Tracker (2025, Methane).

²⁴ Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Methan in der Atmosphäre eine gegenüber Kohlendioxid deutlich geringere Verweildauer hat (Jahrzehnte statt Jahrhunderte) und deshalb eher ein kurzfristig relevantes Problem darstellt; vgl. dazu überblickartig: scinexx.de (2014, Klima); DW (2019, Methan); SCNAT (2023, Klimawirkung).

²⁵ World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 38. Analog erklärt auch: WMO (2025, Climate), S. 1: „Concentrations of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), two other key greenhouse gases, also reached record high observed levels in 2023.“

Trotz dieser Diskrepanz richtet sich das Hauptaugenmerk der weltweiten Klimaforschung auf eine **Einschränkung globaler CO₂-Emissionen**. Koordinierte Maßnahmen zur CO₂-Reduktion betreffen heute vor allem die globale **Energieerzeugung** (verstärkte Umstellung auf erneuerbare Energien), **industrielle Prozesse** („Dekarbonisierung“ mit unterschiedlichen Verfahren), das **Transportwesen** (Ersatz von Schweröl oder Diesel durch alternative Energieformen), den **Individualverkehr** (Umstellung auf Elektroantriebe) aber auch den **Bau- und Rohstoffsektor** (bei der Zementherstellung und -verarbeitung fällt ein mit 5-8% nicht unerheblicher Teil der weltweiten CO₂-Emissionen an).²⁶

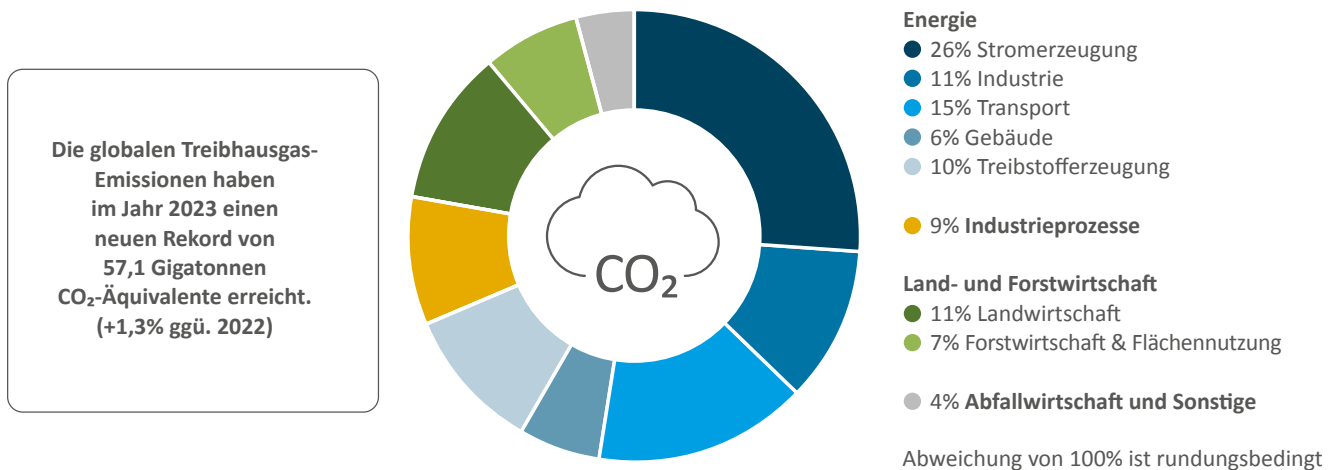
Abb. 5 gibt einen Überblick über die Zusammensetzung der wichtigsten für CO₂-Emissionen verantwortlichen Sektoren und deren jeweilige Anteile.²⁷

“
Jede zusätzliche Tonne freigesetzter Treibhausgase treibt die Erderwärmung weiter voran.

World Ocean Review (2024, Klimakrise)

“
 Ein Hauptproblem der Treibhausgasemissionen liegt in deren **zeitlicher Dimension**, denn: Die schädliche Klimawirkung von CO₂ beginnt unmittelbar und erreicht nach zehn Jahren ihr Maximum; bleibt dann aber „... über mindestens ein Jahrhundert lang nahezu gleich stark.“²⁸

Abb. 5: Sektorale Verteilung der wichtigsten CO₂-Emittenten



Quelle: Statista (2024, Treibhausgasemissionen); basierend auf UN Emissions Gap Report 2024

²⁶ Vgl. zum Anteil der Zementherstellung: VDI Nachrichten (2025, CO₂-Reduktion); ergänzend auch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 36: „In Deutschland ist die Herstellung einer Tonne Zement mit Kohlendioxidemissionen von rund 600 Kilogramm verbunden.“

²⁷ Vgl. dazu: Statista (2024, Treibhausgasemissionen); vgl. dazu detailliert auch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 36; sowie: UNEP (2024, Gap), S. 7.

²⁸ scinexx.de (2014, Klima).

Das Dilemma der heutigen Klimaschutzmaßnahmen, die notwendigerweise stark auf eine Reduktion schädlicher Treibhausgasemissionen ausgerichtet sind, liegt somit in **zwei zentralen Aspekten**:

- Einerseits wirken selbst massive Einschränkungen bei den heutigen **CO₂-Emissionen** nur stark zeitverzögert, da sich CO₂ **über Jahrzehnte** in der Atmosphäre anreichert. (Der heute messbare Treibhauseffekt basiert auf Emissionen, die mindestens zehn Jahre zurückliegen.)²⁹
- Andererseits werden zahlreiche – natürliche oder anthropogene – Quellen für den Ausstoß von **Methan** in der öffentlichen Diskussion stark vernachlässigt (oder ignoriert). Da Methan auf kürzere Frist **wesentlich stärker klimaschädlich** wirkt als CO₂ (mit einem Faktor von 30 bis 100!), liegt hier ein sehr negativer Hebel für schädliche Klimaeffekte der nächsten Jahre.³⁰

Zum oftmals unterschätzten Problem der **Methan-Emissionen** erklärt *World Ocean Review* (2024):

*„Der Weltklimarat kommt in seinem aktuellen Bericht zu dem Schluss, dass die steigenden Emissionen von Methan von 1850 bis 2019 für etwa 0,5 Grad Celsius der in dieser Zeit beobachteten globalen Erwärmung verantwortlich waren. Rechnet man die Methankonzentration und ihre Klimawirksamkeit in das entsprechende Kohlendioxid-Äquivalent um, dann machten die vom Menschen verursachten Methanemissionen im Jahr 2019 rund **18 Prozent der Gesamtemissionen** aus.“³¹*

3.1.3 Die Beziehung zwischen Treibhauseffekt und Erderwärmung

Aus Sicht der heutigen Klimaforschung gibt es klare und unwiderlegbare Belege für einen direkten Zusammenhang zwischen dem menschengemachten (anthropogenen) Prozess eines vermehrten Ausstoßes von CO₂ und anderen Treibhausgasen einerseits sowie der klar messbaren und zuletzt immer deutlicher hervortretenden **Erderwärmung** andererseits. Die entsprechenden Manifestationen und Auswirkungen sind unübersehbar:

- ▶ Sämtliche Messwerte der letzten Jahre zeigen ein eindeutiges Bild, mit einem stark **steigenden Trend der weltweiten Durchschnittstemperatur** (vgl. Abb. 6).³²

Gleichzeitig ist eine **direkte und kausale Beziehung** zwischen der Zunahme der globalen Erwärmung sowie dem Anstieg der weltweiten Treibhausgasemissionen eindeutig nachweisbar:

- ▶ *„Jede zusätzliche Tonne freigesetzter Treibhausgase treibt die Erderwärmung weiter voran. (...) Diesen fast linearen Zusammenhang kann die Wissenschaft zumindest für Kohlendioxid mittlerweile sehr gut belegen.“³³*

Diesen Konnex konstatiert in aller Deutlichkeit auch der *Weltklimarat IPCC* (2023) und nennt dies:

- ▶ *„The causal chain from emissions to resulting warming of the climate system.“³⁴*

Abb. 7 verdeutlicht den entsprechenden Kausalzusammenhang, wobei auch die unterschiedlichen Teilbeiträge natürlicher Ursachen und primär menschlicher Aktivitäten aufgeschlüsselt werden.³⁵

²⁹ Unter anderem dieser Aspekt führt zu einer gewissen „Trägheit des Klimawandels“; vgl. dazu weiterführend: unten, Kap. 4.2 und 4.6; sowie ausführlich: *World Ocean Review* (2010, Weltmeere). Explizit dazu auch *World Ocean Review* (2024, Klimakrise), S. 34: „Aus diesem Grund verbleibt Kohlendioxid mitunter bis zu 1000 Jahre lang in der Erdatmosphäre und entfaltet eine entsprechend lange Klimawirkung.“

³⁰ Genau aus diesem Grund müsste ein stärkerer Fokus auf die Einschränkung globaler Methan-Emissionen gelegt werden; vgl. dazu etwa: DW (2019, Methan); SCNAT (2023, Klimawirkung).

³¹ *World Ocean Review* (2024, Klimakrise), S. 38.

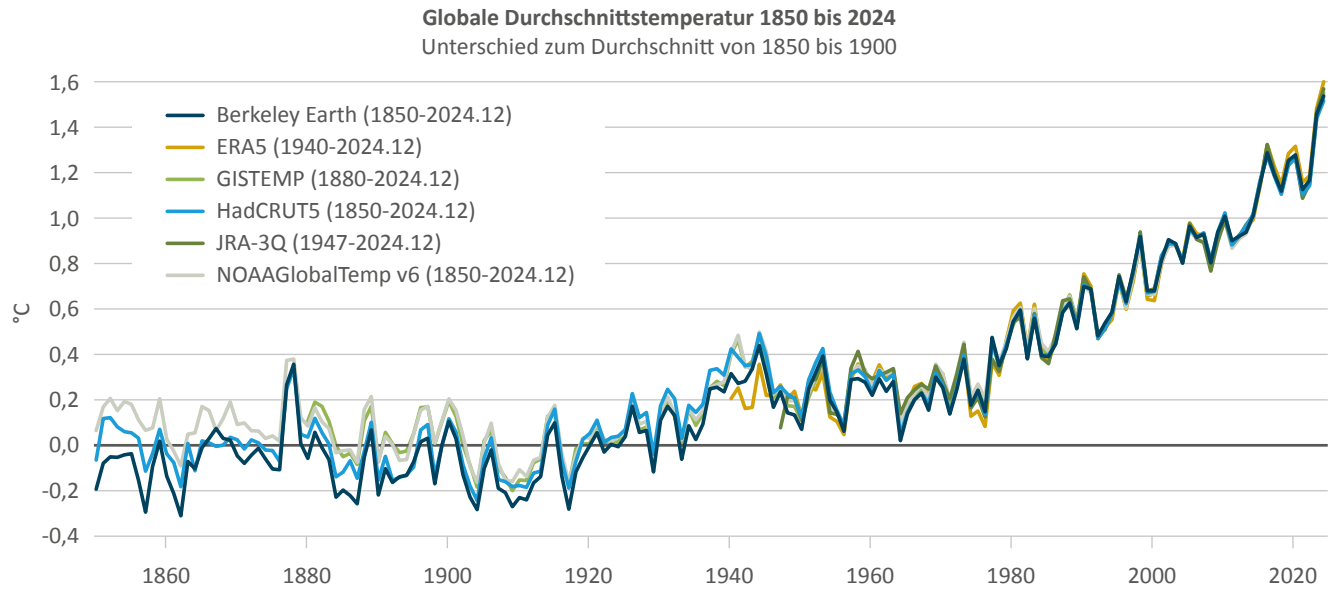
³² Vgl. dazu grundsätzlich: WMO (2025, Climate); dort auch die Daten zur Abbildung.

³³ *World Ocean Review* (2024, Klimakrise), S. 39; (vgl. dort ausführlich zum Thema: S. 35-51). Zum grundsätzlichen Zusammenhang und der aktuellen Dynamik vgl. ausführlich auch: UNEP (2024, Gap).

³⁴ IPCC (2023, Report), S. 43; (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁵ Vgl. dazu ausführlich: *World Ocean Review* (2024, Klimakrise), S. 34-38.

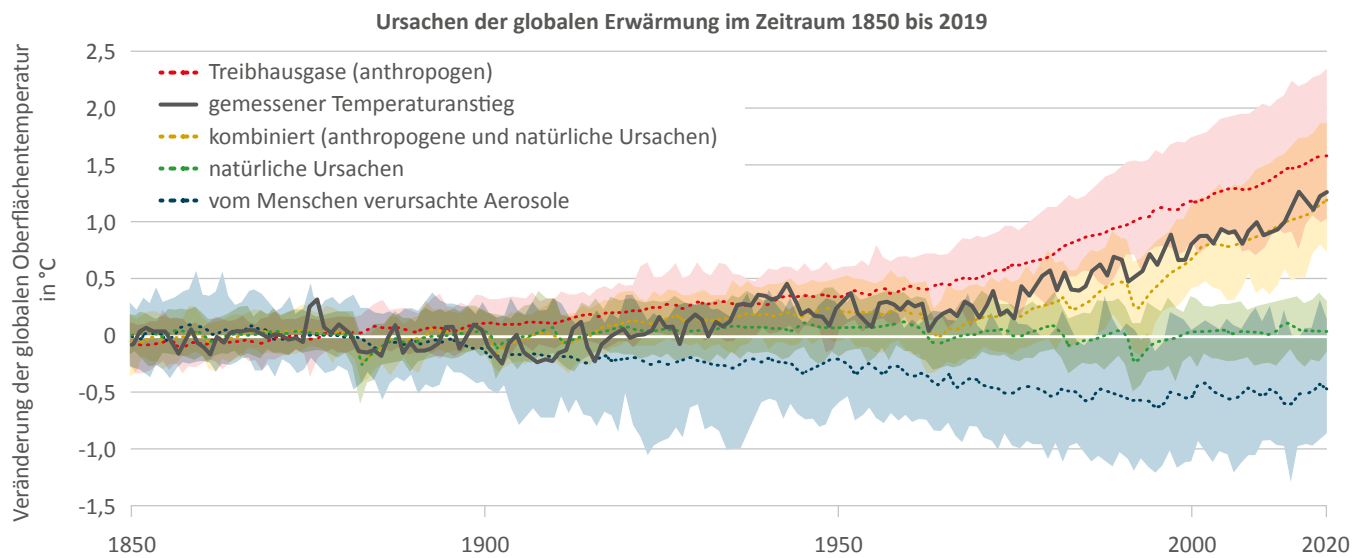
Abb. 6: Deutlicher Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur



Jährliche globale mittlere Temperaturabweichungen im Vergleich zu einer vorindustriellen Basislinie (1850-1900) von 1850 bis 2024

Quelle: WMO (2025, Climate)

Abb. 7: Kausale Beziehung zwischen Erderwärmung und Treibhausgasemissionen



Quelle: World Ocean Review (2024, Klimakrise)

Speziell in den letzten Jahren war dieser „gemeinsame“ Anstieg so stark, dass weltweit nicht nur zahlreiche Temperaturrekorde, sondern erstmals auch die **kritische Marke von 1,5°C** gebrochen wurde; dieses Niveau bildet bekanntlich die Grundlage für den Zielwert des *Pariser Klimaabkommens*.³⁶

Dazu die folgenden Statements der *World Meteorological Organization (WMO)*:

- ▶ „**2024 was the warmest year on record, with the globally averaged near-surface temperature estimated at 1.55°C ± 0.13°C above the 1850-1900 baseline.**“³⁷
- ▶ „**2024 was likely the first calendar year to be more than 1.5°C above the pre-industrial era.**“³⁸

Nach heutigem Stand der Forschung befindet sich die Welt derzeit auf einem beschleunigten Pfad in Richtung einer **Erwärmung von rund 2,2 bis 3,4°C** gegenüber dem vorindustriellen Referenzniveau – selbst bei strikter Einhaltung „... *äußerst ambitionierter Klimaschutzmaßnahmen und drastischer Verminderung der CO₂- und anderer Treibhausgas-Emissionen*“.³⁹

- ▶ Nach Auswertung der wichtigsten Forschungsergebnisse sind deshalb „... *die allermeisten Wissenschaftler (...) inzwischen der Meinung, dass die Erderwärmung nicht auf 1,5 Grad Celsius beschränkt bleiben wird.*“⁴⁰
- ▶ Eine aktuelle Studie der britischen *Universität Bristol* und der österreichischen *Universität Innsbruck* stellt fest, dass „... *die derzeitige Klimapolitik die Erde auf eine Erwärmung von fast 3°C zusteuern lässt.*“⁴¹

³⁶ Zu den jüngsten Daten vgl. WMO (2025, Climate). Vgl. dazu grundsätzlich: Umweltbundesamt (2025, 1,5-Grad-Ziel). Dabei geht es allerdings um ein *dauerhaftes* Überschreiten dieses Temperaturniveaus; vgl. dazu spezifisch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 42: „*Die 1,5-Grad-Grenze ist erreicht, wenn über einen Zeitraum von 20 Jahren die durchschnittliche Oberflächentemperatur 1,5 Grad Celsius über dem Durchschnittswert des Vergleichszeitraumes 1850 bis 1900 gelegen hat.*“ Noch präziser dazu: WMO (2025, Climate), S. 21: „*By this definition, 1.5°C of warming would only be confirmed once the observed temperature has reached that level over a 20-year period, 10 years after the year of exceedance.*“

³⁷ WMO (2025, Climate), (Key Messages); (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁸ WMO (2025, Reel).

³⁹ Umweltbundesamt (2025, Klimaänderungen). Zu den aktuellen Erwartungswerten der Erderwärmung vgl.: Climate Action Tracker (2025, Thermometer).

⁴⁰ Blome (2025, Wahrheiten), S. 162-163. In diesem Sinne auch: *Johan Rockström*, Direktor am *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)*: „*Die Welt steuert auf eine globale Erwärmung von 2-3°C zu.*“; zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte).

⁴¹ Zitiert nach: Euronews (2025, Gletscher). Damit sind die Schätzungen einer ausführlichen Studie von Möller et al. (2024, Tipping Risks) bereits überholt, die noch von 2,6°C Erwärmung ausging (mit einer Bandbreite zwischen 1,7-3,0°C).

⁴² Vgl. dazu grundlegend: University of Exeter, *Global Tipping Points (2025, Report)*; PIK (2022, Klima-Kippunkte); vgl. weiterführend und mit zahlreichen Quellennachweisen auch: unten, Kap. 4.

Durch den offenkundig weiter zunehmenden Erwärmungstrend werden – innerhalb sehr kurzer Zeiträume! – vorherige Einschätzungen selbst von „Klima-Koryphäen“ wie *Johan Rockström* von der Realität überholt, wie dessen (mittlerweile überholtes) Zitat aus dem Jahr 2022 belegt:

“

Die Welt steuert auf eine globale Erwärmung von 2-3°C zu.

Johan Rockström, Direktor Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 2022

”



In diesem Video erläutert *Prof. Dr. Johan Rockström*, was derzeit über die Risiken bekannt ist, die eine Destabilisierung des Planeten mit sich bringt.

Genau hier liegt der direkte Bezug zum **Phänomen der globalen Klimakippunkte**, denn:

- ▶ Mit jedem noch so marginalen Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen erhöht sich nicht nur die Wahrscheinlichkeit des Auslösens, sondern auch die Dynamik des Umkippens wichtiger *Climate Tipping Points* signifikant – meist **sprunghaft und mit nichtlinearer Intensität**.⁴²

Dies ist der Aspekt, der im Fokus der vorliegenden Analyse steht – der aber offenbar für viele Menschen noch immer nicht als relevant oder gar dringlich erscheint.

Aktuelle Entwicklungen in Deutschland

Vor dem Hintergrund der globalen Klimadynamik, die offensichtlich schnell weiter voranschreitet, ist ein kurzer Blick auf die **Situation in Deutschland** angebracht:

- ▶ Gemäß aktualisierten Berechnungen von *Deutscher Wetterdienst* (2025) hat der Grad der Erwärmung in Deutschland bereits ein **Niveau von rund 2,5°C** gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter erreicht!⁴³ (Vgl. dazu Abb. 8).
- ▶ Deutschland durchläuft somit bereits **typische Symptome eines echten Klimawandels**, spürbar auch an der steigenden Anzahl extremer Wetterereignisse.⁴⁴
- ▶ Eine weitere **Zunahme adverser Klimafolgen** in Deutschland ist schon in sehr naher Zukunft absehbar, darunter ein rasches Abschmelzen der meis-

ten deutschen Gletscher – möglicherweise schon bis Ende der aktuellen Dekade.⁴⁵

- ▶ Als besonders schwerwiegend könnte sich dabei eine rasche **Verschlechterung bisher stabiler Wasserhaushalte** in Flüssen, Seen und Mittelgebirgen erweisen – mit negativen Folgen für Wald- und Baumbestände, Landwirtschaft und Flussschifffahrt.⁴⁶

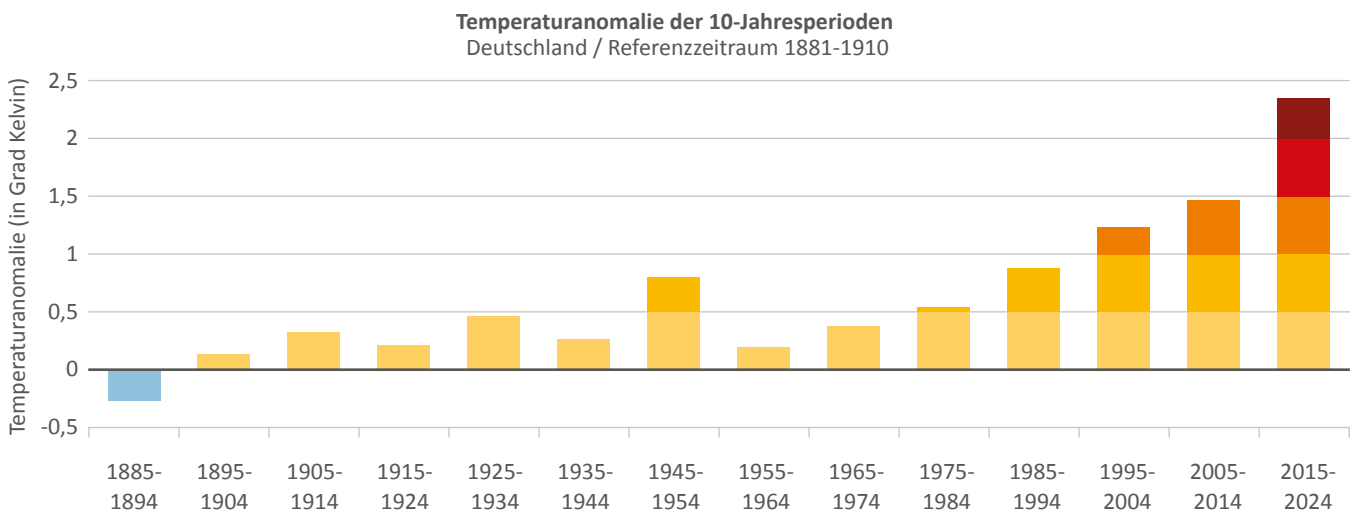
Hier geht's direkt zur Bilddokumentation „Wie der Klimawandel Deutschland verändert“:



Eine kurze Videoanimation der *World Meteorological Organization (WMO)* verdeutlicht den Prozess einer seit Jahrzehnten fortschreitenden planetaren Erwärmung. Hier geht's direkt zum Kurzvideo:



Abb. 8: Überproportionaler Anstieg der Durchschnittstemperaturen in Deutschland



Quelle: DWD (2025, Klimapressekonferenz)

⁴³ Vgl. dazu: DWD (2025, Intensivierung); DWD (2025, Klimapressekonferenz). Analog dazu auch: MDR (2025, Wärmer); ntv (2025, Erwärmung).

⁴⁴ Vgl. dazu mit ausführlicher Bilddokumentation: ntv (2025, Klimawandel).

⁴⁵ Vgl. dazu mit ausführlicher Bilddokumentation: ntv (2025, Klimawandel).

⁴⁶ Vgl. dazu mit ausführlicher Bilddokumentation: ntv (2025, Klimawandel).

3.2 Wissenschaftlicher Kontext und Bezüge zur Klimaforschung

3.2.1 Das globale Klima als komplexes dynamisches System

Entscheidend für die wissenschaftliche Erforschung globaler Klimafragen ist das „richtige“ Verständnis des planetaren Klimas als **komplexes und dynamisches System**. Dieser Ansatz, der in den letzten Jahren zunehmend geschärft und dessen Grundlagen stetig weiterentwickelt wurden, erfordert zwingend eine **ganzheitliche und vernetzte Betrachtung**.⁴⁷

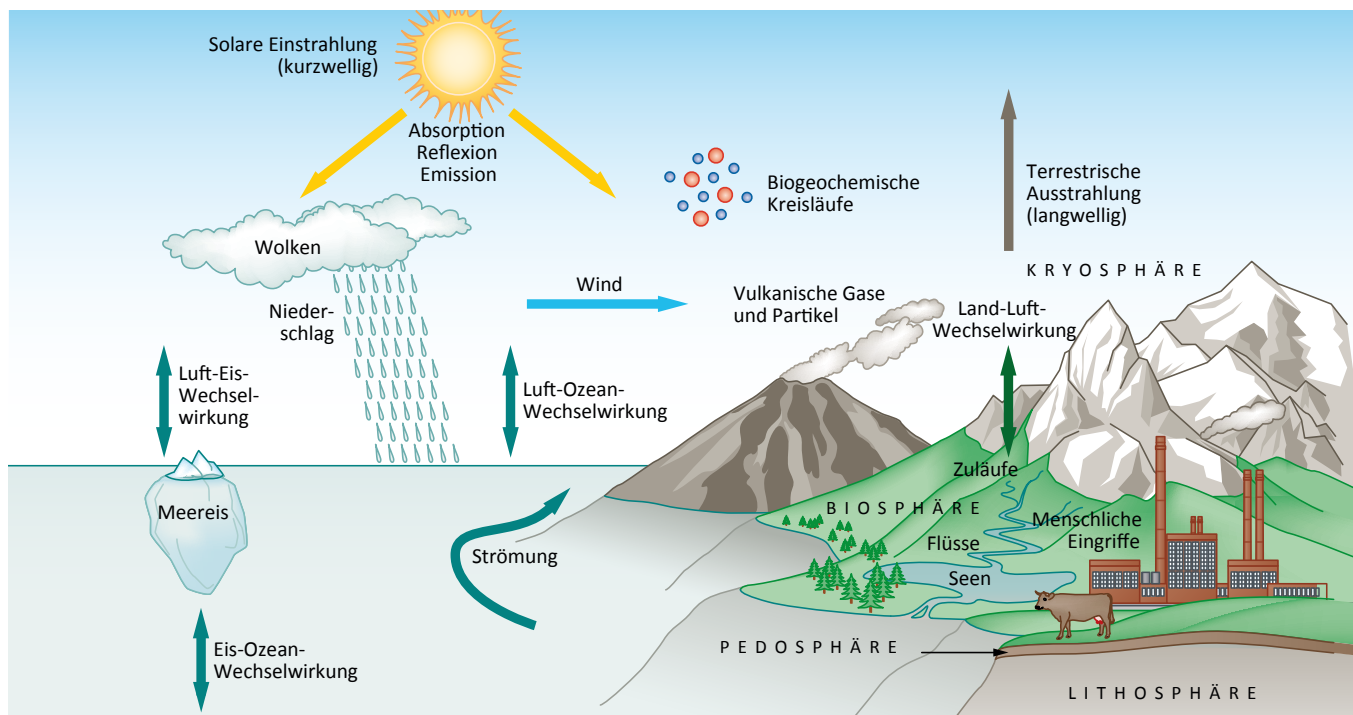
Hierfür ist ein **umfassendes Verständnis des Erdsystems** erforderlich, das nicht nur die unterschiedlichen Sphären des Erdklimas erfasst, sondern auch deren vielfältigen **Interaktionen** und komplexen **Wechselwirkungen** – oftmals geprägt

durch selbstverstärkende **Rückkopplungen** und andere **nicht-lineare Effekte** – möglichst vollständig identifiziert und nachvollzieht.⁴⁸

Ausgangspunkt dafür bildet stets ein tiefes Verständnis für die **inhärente Komplexität und Dynamik** des Klimasystems, das aus den Interaktionen unterschiedlicher Teilsysteme resultiert und daraus jeden Tag ein neues „Klimaergebnis“ produziert – leider auch mit sehr klar definierter und oftmals **irreversibler Wirkung für die Zukunft** (vgl. dazu überblickartig Abb. 9). Dabei gilt:

- ▶ „Das Klima der Erde wird durch viele Faktoren wie Sonnenstrahlung, Wind oder Meeresströmungen geprägt. Forscher versuchen, diese Einflussgrößen in Modellen zu vereinen. Inzwischen hat man viele Prozesse verstanden. Das Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren ist aber derart komplex, dass noch immer viele Fragen offen sind.“⁴⁹

Abb. 9: Klimasystem als Ergebnis komplexer Prozesse und Wechselwirkungen



Quelle: World Ocean Review (2010, Klimasystem)

⁴⁷ Vgl. dazu etwa: Climate Analytics (2024, Klimasystem).

⁴⁸ Dieser Ansatz hat sich erfreulicherweise in den letzten Jahren in der Klimaforschung durchgesetzt und ist Grundlage spezifischer Forschungsbereiche und Verfahren für „Erdsystemanalyse“ (vertreten etwa durch Stefan Rahmstorf, Leiter der Abteilung für Erdsystemanalyse, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Niklas Boers, Professor für Erdsystemmodellierung an der Technischen Universität München (TUM) oder Nico Wunderling, Erdsystemforscher am Center for Critical Computational Studies (C³S), Goethe-Universität Frankfurt).

⁴⁹ World Ocean Review (2010, Klimasystem).

Als **Komplexität** wird im hier vorliegenden Zusammenhang das Vorliegen eines vernetzten Systems verstanden, das durch eine **Vielzahl dynamischer Wechselwirkungen** und selbstverstärkender Mechanismen gekennzeichnet ist. Die Interaktionen im System erzeugen inhärente (meist positive) **Rückkopplungen**, was charakteristische **Nicht-linearitäten** und oftmals abrupt einsetzende **Eskalationen** und **Kaskadeneffekte** impliziert.

Entsprechend sind sowohl die wichtigsten Einflussfaktoren als auch deren komplexe – und oftmals sehr schwer erkennbaren – Interdependenzen und gegenseitigen Abhängigkeiten zu erfassen. Dabei müssen insbesondere komplizierte **nicht-lineare Dynamiken** berücksichtigt und verstanden werden – dazu zählen primär **positive Rückkopplungen** und sogenannte **Kaskadeneffekte**.⁵¹ Denn:

- ▶ „Die Komponenten des Erdsystems sind durch Wechselwirkungen wie beispielsweise Wärme- und Stoffaustausch verbunden. Das Konzept der Kippkaskaden illustriert die starke Vernetzung des Erdsystems und das Potential oft unvorhergesehener klimatischer und ökologischer Konsequenzen. So kann das Kippen eines Elements die Kippdynamiken anderer Elemente befördern.“⁵²



Das Erdsystem ist wie ein Mobile, das einzelne Elemente wie die globalen Eisschilde, riesige Waldgebiete oder Meeresströmungen miteinander verbindet und im Gleichgewicht hält.

IDW (2025, Klima-Dominoeffekt)



Der menschengemachte Klimawandel kann zu einer Destabilisierung von großräumigen Bestandteilen des Erdsystems wie Eisschilden, oder Mustern von Luft- und Ozeanströmungen führen – den sogenannten Kippelementen.

Goethe-Universität Frankfurt (2024, Kipp-Risiken)



Vor diesem Hintergrund betont Wunderling (2025), der im Bereich „Erdsystemwissenschaften“ die komplexen Wechselwirkungen von Kippelementen im Erdsystem erforscht:

- ▶ „Das Klimasystem ist wie eine Reihe von Dominosteinen.“⁵⁰

Speziell in den letzten Jahren hat die Klimaforschung die enorme Bedeutung klimatischer Wechselwirkungen und **inhärenter Rückkopplungs- und Selbstverstärkungsmechanismen** („Feedback Loops“) zunehmend erkannt. Wurden klimatische Veränderungen und spezielle Phänomene früher oftmals nur isoliert erforscht, werden inzwischen überwiegend **systemdynamische Analysekonzepte** verfolgt.⁵³

⁵⁰ Nico Wunderling, Professor am Frankfurter Center for Critical Computational Studies (C³S) sowie am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, zitiert nach: Lohmann (2025, Klimagespräche), (Kap. 4).

⁵¹ Vgl. dazu etwa: Umweltbundesamt (2023, Kippdynamiken); VDI (2024, Kaskadeneffekte). Vgl. dazu ausführlich auch: Rahmstorf et al. (2019, Kippunkte); sowie weiterführend auch: unten, Kap. 4.3.

⁵² Umweltbundesamt (2023, Kippdynamiken), (Zitat mit geringfügiger sprachlicher Korrektur).

⁵³ Exemplarisch ist hierfür der Ansatz des Klimaforschers Nico Wunderling, der bei seinen Untersuchungen am Frankfurter Center for Critical Computational Studies (C³S) explizit die „Dynamik miteinander interagierender Kippelemente im Erdsystem“ analysiert und modelliert; vgl. dazu: PIK (2025, Wunderling); sowie weiterführend: unten, Kap. 4.4-4.5.

- ▶ Zunehmend kommen dabei **komplexe Simulationsmodelle** zur Anwendung, was nur durch Einsatz extrem leistungsfähiger „*Supercomputer*“ überhaupt möglich wird.⁵⁴ (Vgl. dazu auch den nachfolgenden Exkurs zu einem „*Digitalen Zwilling*“ des globalen Klimasystems).

Die systemische Dynamik und das Zeitprofil hinter kritischen Klimaveränderungen – wie etwa dem Abschmelzen der Polkappen oder dem Rückgang des Eisschildes in Grönland – können so wesentlich präziser erfasst und modelliert werden.⁵⁵ In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle hat dies jedoch auch eine – oftmals erhebliche – **Höherstufung der zugehörigen Kritikalität** zur Folge.⁵⁶

Der Jahresbericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* aus dem Jahr 2023 erklärt dazu („*high confidence*“):

- ▶ „*For any given future warming level, many climate-related risks are higher than assessed in AR5, and projected long-term impacts are up to multiple times higher than currently observed.*“⁵⁷

Auch zu den möglichen Kipprisiken im Klimasystem warnt bereits *IPCC* (2023):

- ▶ „***Abrupt responses and tipping points of the climate system, such as strongly increased Antarctic ice-sheet melt and forest dieback, cannot be ruled out (high confidence).***“⁵⁸

Mit anderen Worten:

- ▶ Das bessere Verständnis des globalen Klimasystems – und dessen Wahrnehmung als ein eng vernetztes und hochdynamisches Geflecht unterschiedlichster **Wechselwirkungen und Rückkopplungen** – führt unvermeidlich zu einer signifikanten Verschärfung zukünftig zu erwartender klimatischer **Eskalations- und Bedrohungsszenarien!**⁵⁹

Die Erkenntnis, dass Veränderungen des globalen Klimas **nicht linear** verlaufen, sondern stattdessen in bestimmten Bereichen und unter bestimmten Bedingungen abrupte **Kipodynamiken** ausprägen können, die nach Überschreiten eines „**Kippunktes**“ ein zuvor relativ stabiles und resilientes System „**sprunghaft**“ in einen völlig anderen Systemzustand überführen, ist in der Klimaforschung noch relativ neu. Sie geht insbesondere zurück auf grundlegende Arbeiten von *Timothy Lenton* (und Kollegen), der an der *University of Exeter* forscht und dort mit dem *Global Systems Institute* ein renommiertes Zentrum zur Erforschung der *Global Tipping Points* aufgebaut hat.⁶⁰

Wichtige weiterführende Arbeiten stammen von *David Armstrong McKay* (2022) sowie – inzwischen auch in Deutschland – unter anderem vom *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)* und dem Erdsystemforscher *Nico Wunderling* (2021).⁶¹

⁵⁴ Vgl. dazu: DKRZ (2025, Klimaforschung); sowie ausführlich: unten, Kap. 3.2.3.

⁵⁵ MPI-M (2025, Klimamodellierung) erklärt dazu: „*Dabei spiegelt die Zunahme der Komplexität über die Jahrzehnte nicht nur die Steigerung der Rechenleistung wider, sondern sie wurde auch als Methode genutzt, um das Verständnis zu verbessern.*“

⁵⁶ Vgl. dazu die Ergebnisse jüngerer Forschungsberichte auf Basis hoch entwickelter Simulationsmodelle; exemplarisch etwa: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report); IPCC (2023, Report); IISD (2025, Report). Eine gute Gesamtdarstellung dazu findet sich auch bei: Armstrong McKay et al. (2022, *Climate Tipping Points*). Vgl. zum Aspekt der erhöhten systemischen Kritikalität auch die schematische Darstellung in Abb. 19 (Kap. 5.1).

⁵⁷ IPCC (2023, Statements); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁵⁸ IPCC (2021, Climate), S. 27; (Hervorhebungen durch Verfasser); auch zitiert bei: Meckie (2021, *Tipping Points*), S. 2.

⁵⁹ Auf diesen Punkt weisen namhafte Klimaforscher in den letzten Jahren mit zunehmender Dringlichkeit hin. Umso unverständlicher sind vor diesem Hintergrund die verharmlosenden oder schlicht ignoranten Reaktionen auf Teilen der politischen Weltbühne (insbesondere jedoch der US-Regierung unter *Donald Trump*).

⁶⁰ Vgl. dazu grundlegend: Lenton et al. (2008, *Tipping*).

⁶¹ Vgl. dazu überblickartig: Lenton et al. (2008, *Tipping*); sowie University of Exeter (2025, Lenton); Armstrong McKay (2022, *Climate Tipping Points*); Wunderling (2021, *Dynamiken*); PIK (2025, Erdsystem); PIK (2025, Erdsystemanalyse).

Ein **digitaler Zwilling** ist eine datenbasierte Modellierung eines echten Gegenstands oder Systems und zeigt, wie sich diese in der Realität verhalten. Der „Zwilling“ wird laufend mit echten Daten versorgt (etwa aus Sensoren) und kann dadurch ständig aktualisiert werden. So lassen sich Abläufe und dynamische Prozesse besser verstehen, testen oder verbessern, ohne direkt in die echte Umgebung eingreifen zu müssen.

Digitaler Zwilling: Komplexe Klimamodellierung mit Hilfe moderner Hochleistungscomputer

Aufgrund der komplexen Struktur des Erdsystems sowie der zahlreichen Interdependenzen relevanter Klimafaktoren ist eine Modellierung potentieller Klimaveränderungen (per Definition) nicht nur äußerst anspruchsvoll, sondern auch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.⁶² So verweisen die Klimaforscher *Olonscheck/Rugenstein* (2024) – stellvertretend für viele vergleichbare Konstellationen – auf **erhebliche Unsicherheiten/Unschärfen** sogenannter „gekoppelter Modelle“ zur Simulation von Klimaänderungen; dabei wird festgestellt, dass:

- „... die Modelle die beobachtete Stärke der Kopplung systematisch unterschätzen“, was „... zu einer möglicherweise zu hohen Klimasensitivität einiger Modelle beiträgt.“⁶³

Eine spätere Studie von *Myhre et al.* (2025) scheint diesen Aussagen jedoch zu widersprechen, was letztlich die generelle Problematik diverser Modellansätze unterstreicht.⁶⁴

Neben Schwierigkeiten bei der Auswahl und Messung repräsentativer Ausgangsdaten liegt das Problem traditioneller Klimamodelle in einer oftmals **unzureichenden Erfassung systemischer Interdependenzen und Rückkopplungseffekte**.⁶⁵ Eine Auflösung dieses Zielkonflikts erfordert, neben exakt spezifizierten Parametern, Computersysteme mit enormer Rechenleistung, denn:

- Nur so lassen sich hochkomplexe Berechnungen und multidimensionale Simulationen durchführen und zu aussagefähigen Ergebnissen verdichten.⁶⁶

Vor diesem Hintergrund versuchen Klimaforscher, durch Einsatz extrem leistungsfähiger Computersysteme – wie etwa „Europas schnellstem Supercomputer JUPITER“ – eine Art **digitalen Zwilling des Erdsystems** zu erstellen, um so künftig wesentlich umfassendere und präzisere Simulationen der Klimaveränderung zu ermöglichen.⁶⁷

- Derartige Ansätze sowie eine möglichst integrierte Verknüpfung unterschiedlicher quantitativer Modelle bieten prinzipiell leistungsfähige Werkzeuge, um im Wettlauf gegen drohende Klimarisiken noch hilfreiche Antworten zu finden.⁶⁸

⁶² Vgl. dazu überblickartig: Lupo/Kininmonth (2013, Models).

⁶³ MPI-M (2024, Klimamodelle); unter Verweis auf die Originalstudie von Olonscheck/Rugenstein (2024, Models). Als „gekoppelte Modelle“ werden solche Modelle bezeichnet, die atmosphärische und ozeanische Klimaeffekte miteinander verbinden und versuchen, deren Wechselwirkungen und Gesamteffekte zu simulieren.

⁶⁴ Vgl. dazu: Myhre et al. (2025, Models).

⁶⁵ MPI-M (2024, Klimaprojektionen) bemerkt dazu: „In den vergangenen Jahrzehnten wurden Veränderungen im Erdsystem beobachtet, die herkömmliche Modellierungsansätze nicht erklären können. Die relevanten Prozesse werden demnach offenbar mangelhaft erfasst.“

⁶⁶ Das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) stellt die in diesem Kontext zentrale Frage: „Was wäre, wenn in Zukunft die Klimaforschung die geeigneten Instrumente bereitstellte, um die Auswirkungen des Klimawandels vorherzusagen und damit zu helfen, die Folgen abzumildern?“; MPI-M (2024, Klimaprojektionen); analog auch: MPI-M (2025, Klimamodellierung).

⁶⁷ Vgl. dazu ausführlich: MPI-M (2025, JUPITER): „Mit mehr als einer Trillion (...) Gleitkommaoperationen pro Sekunde (FLOPS) wird der am Forschungszentrum Jülich installierte Hochleistungscomputer der erste sogenannte Exascale-Rechner auf dem europäischen Kontinent sein.“ Zur Vision eines „digitalen Zwillings“ – unter dem Stichwort *DestinE* – vgl. ausführlich: MPI-M (2024, Klimaprojektionen).

⁶⁸ Vgl. dazu überblickartig: MPI-M (2025, Klimamodellierung).

3.2.2 Kippelemente und Kippunkte im globalen Klimasystem

Eine zentrale Rolle für das „systemdynamische“ Grundverständnis des globalen Klimasystems spielen zwei wesentliche Faktoren:

- das Konzept der **Kippelemente** („*tipping elements*“)
- das Prinzip der **Kippunkte** („*tipping points*“).

Als **Kippelemente** gelten diejenigen Teilbereiche und Subsysteme des globalen Klimasystems, die im Gegensatz zu eher graduell verlaufenden Klimaveränderungen **kritische Schwellenwerte** aufweisen, „... bei deren Überschreiten es zu starken und teils unaufhaltsamen und unumkehrbaren Veränderungen kommt.“⁶⁹

- ▶ Kippelemente des Klimas zeichnen sich folglich durch einen abrupten und **sprunghaften Übergang** von einem vorher bestehenden (relativ stabilen) Systemzustand in einen völlig anderen Zustand aus – oft sogar mit Übergang in eine **zerstörerische Eigendynamik**.
- ▶ Entscheidend für diese Konstellation ist das Erreichen oder Überschreiten kritischer Schwellenwerte, der sogenannten **Kippunkte**.⁷⁰

Als **Klimakippunkte** gelten demnach genau diejenigen **kritischen Schwellenwerte**, deren Überschreitung wichtige Kippelemente des Klimasystems zum Umkippen bringt und dadurch bedeutende und oftmals unumkehrbare Klimaveränderungen auslöst. In diesem Sinne definieren *Deutloff/Held/Lenton* (2025) das entsprechende Konzept:

- ▶ „This means that a **tipping point** can be associated with a ‚threshold temperature‘ after which the respective TE [tipping element] is expected to exhibit tipping behaviour.“⁷¹

Das Prinzip der **Klimakippelemente** (**tipping elements**) erklärt *Wunderling* (2021) wie folgt:

- ▶ „Tipping elements are nonlinear subsystems of the Earth system that can potentially abruptly and irreversibly shift if environmental change occurs.“⁷²

Das Konzept der Klimakippunkte ist von absolut zentraler Bedeutung für das Verständnis aktuell ablaufender Klimaveränderungen – insbesondere jedoch für die Abschätzung kritischer Zeit- und Entwicklungspfade sowie die sinnvolle Einordnung drohender Klima- und Transformationsrisiken.⁷³

Abb. 10 zeigt, in Anlehnung an *Rahmstorf et al.* (2019), eine sehr anschauliche „Weltkarte“ mit den **wichtigsten globalen Kippelementen**, jeweils mit Zuordnung zu den drei zentralen Teilsystemen „Eis- und Permafrost“, „Strömungen“ sowie „Ökosysteme“.

Anhand weiterführender Forschungsergebnisse wurde diese ursprüngliche Karte inzwischen deutlich weiterentwickelt und präzisiert; dabei wurden auch die mutmaßlichen **Temperatursensitivitäten** der Kippelemente berücksichtigt – also deren **mögliche Kippunkte** in Abhängigkeit vom Grad der Erderwärmung (vgl. Abb. 11, S. 26).



Klima-Kippelemente sind wichtige, großskalige Bestandteile des Erdsystems, die ein Schwellenverhalten aufweisen.

PIK (2025, Erdsystem)



⁶⁹ Rahmstorf et al. (2019, Kippunkte). Vgl. dazu weiterführend auch den sehr guten Überblick bei: PIK (2025, Erdsystem); sowie: CCCA (2024, Kippunkte).

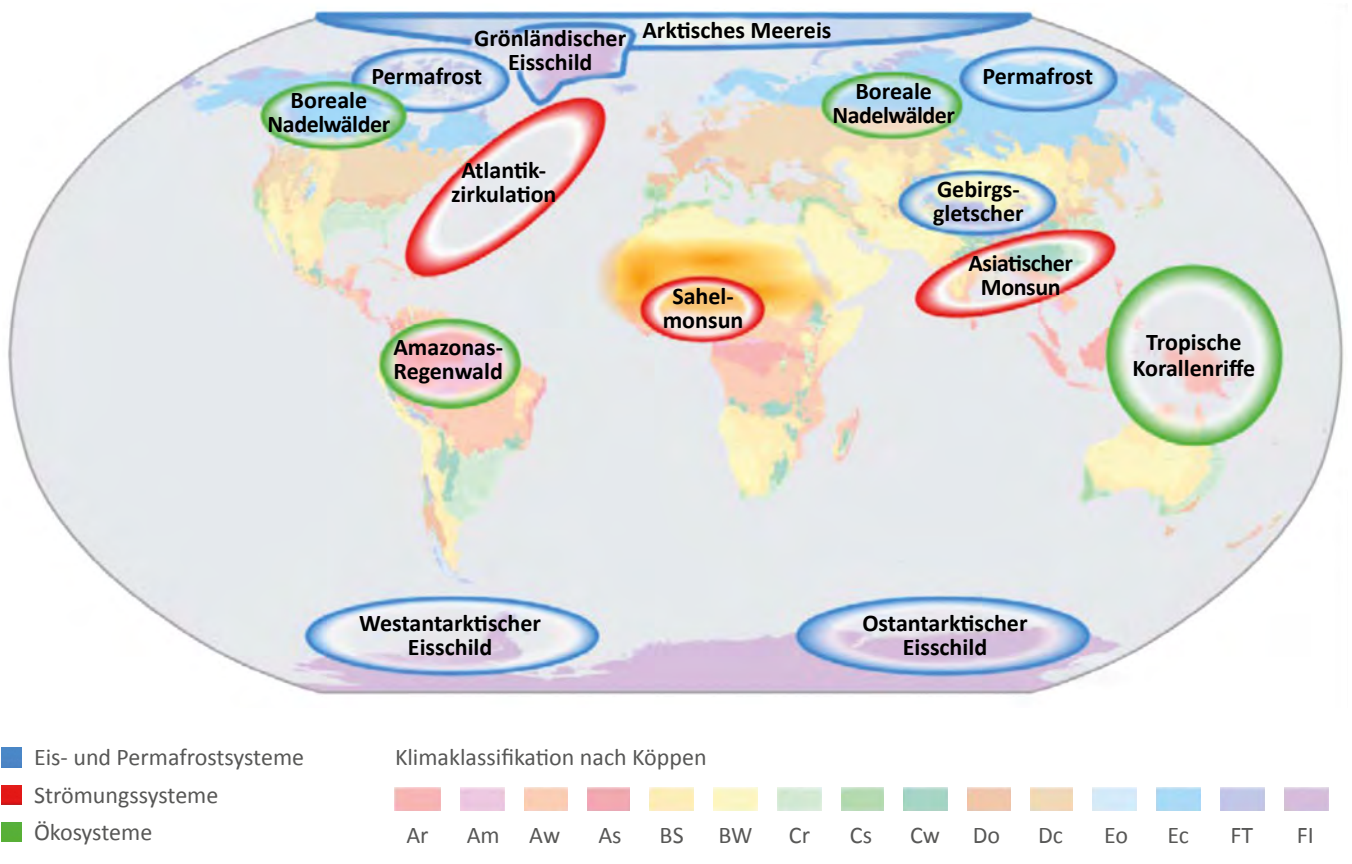
⁷⁰ Vgl. dazu: PIK (2025, Erdsystem), mit einer sehr guten Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstands.

⁷¹ Deutloff/Held/Lenton (2025, Tipping Points), (Introduction); (Hervorhebung durch Verfasser).

⁷² Wunderling (2021, Dynamiken), S. 81.

⁷³ Vgl. dazu grundlegend: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report). Entscheidende Grundlagen zu diesem Verständnis gehen zurück auf Forschungen und Vorarbeiten von: Lenton et al. (2008, Tipping); Lenton et al. (2019, Climate Tipping Points); Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points).

Abb. 10: Karte der wichtigsten Kippelemente des Klimasystems



Quelle: PIK (2019, Kippunkte); (inzwischen überholt)

Oftmals wird in der Diskussion um Klimakippunkte auf mindestens fünf besonders bedeutende Teilsysteme verwiesen, deren Veränderung für die weitere Entwicklung des Weltklimas von entscheidender Bedeutung wäre.⁷⁴

Nach überwiegender Einschätzung sind die wichtigsten **Kippelemente und Kippunkte**:

- das Schmelzen der Eisschilde in Grönland und der Antarktis
- das Verschwinden des arktischen (Winter-)Meereises
- die Verlangsamung oder Umkehr der Atlantischen Umwälzströmung

- die Veränderung großer Ökosysteme wie Regenwälder und Korallenriffe
- das Auftauen des Permafrostbodens mit nachfolgender Methanfreisetzung.⁷⁵

Über diese Haupt-Kippunkte hinaus werden jedoch häufig auch weitere wichtige **relevante Kippelemente** und damit korrespondierende Kippunkte aufgeführt (vgl. dazu Tab. 1, S. 26):⁷⁶

⁷⁴ Vgl. dazu überblickartig: RND (2022, Kippunkte).

⁷⁵ Vgl. dazu etwa: PIK (2025, Kippelemente): „Zu den Kippelementen im Klimasystem zählen etwa die Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis, die große Umwälzströmung im Atlantik, und die Permafrostböden.“; sowie weiterführend: unten, Kap. 5.1.

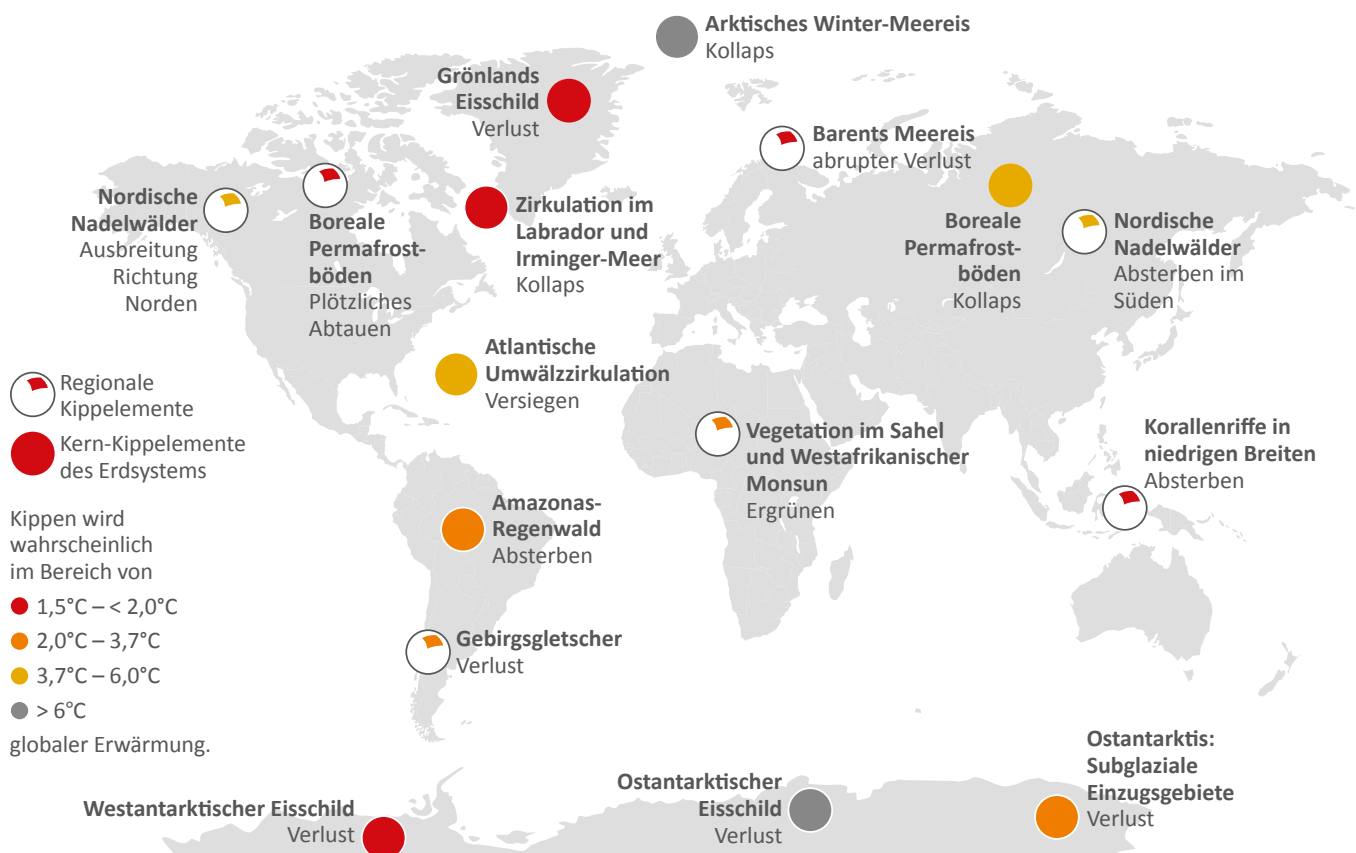
⁷⁶ So untersucht etwa eine neuere Studie des Exzellenzclusters CLICCS der Universität Hamburg 16 mögliche Kippunkte; vgl. dazu: Deutloff et al. (2025, Tipping Points): „We include those uncertainties in our analysis to derive probabilities of triggering for 16 previously identified climate tipping points within the Earth system.“ WWF (2024, Planet), S. 35, bezieht sich hingegen sogar auf „mehr als 25 potentielle Kippunkte“.

Tab. 1: Differenzierte Darstellung globaler Kippelemente

Kern-Kippelement	Regionales Kippelement
Grönlands Eisschild	Barents Meereis
Arktisches Winter-Meereis	Boreale Permafrostböden
Boreale Permafrostböden	Gebirgsgletscher
Westantarktischer Eisschild	Nordische Nadelwälder (Nordamerika)
Ostantarktischer Eispanzer	Nordische Nadelwälder (Asien)
Ostantarktis Subglaziale Einzugsgebiete	Korallenriffe in niedrigen Breiten
Umwälzung im Labrador- und Irminger-Meer im Nordatlantik	Westafrikanischer Monsun und die Vegetation im Sahel
Umwälzzirkulation des Atlantiks (AMOC)	
Amazonas-Regenwald	

Quelle: For Tomorrow (2024, Kippelemente); leichte Modifikation

Abb. 11: Globale Kippelemente und deren wahrscheinliche Kippunkte



Räumliche Verteilung der globalen und regionalen Kippelemente.
Die Farben bezeichnen den Temperaturbereich, in dem ein Kippen wahrscheinlich wird.

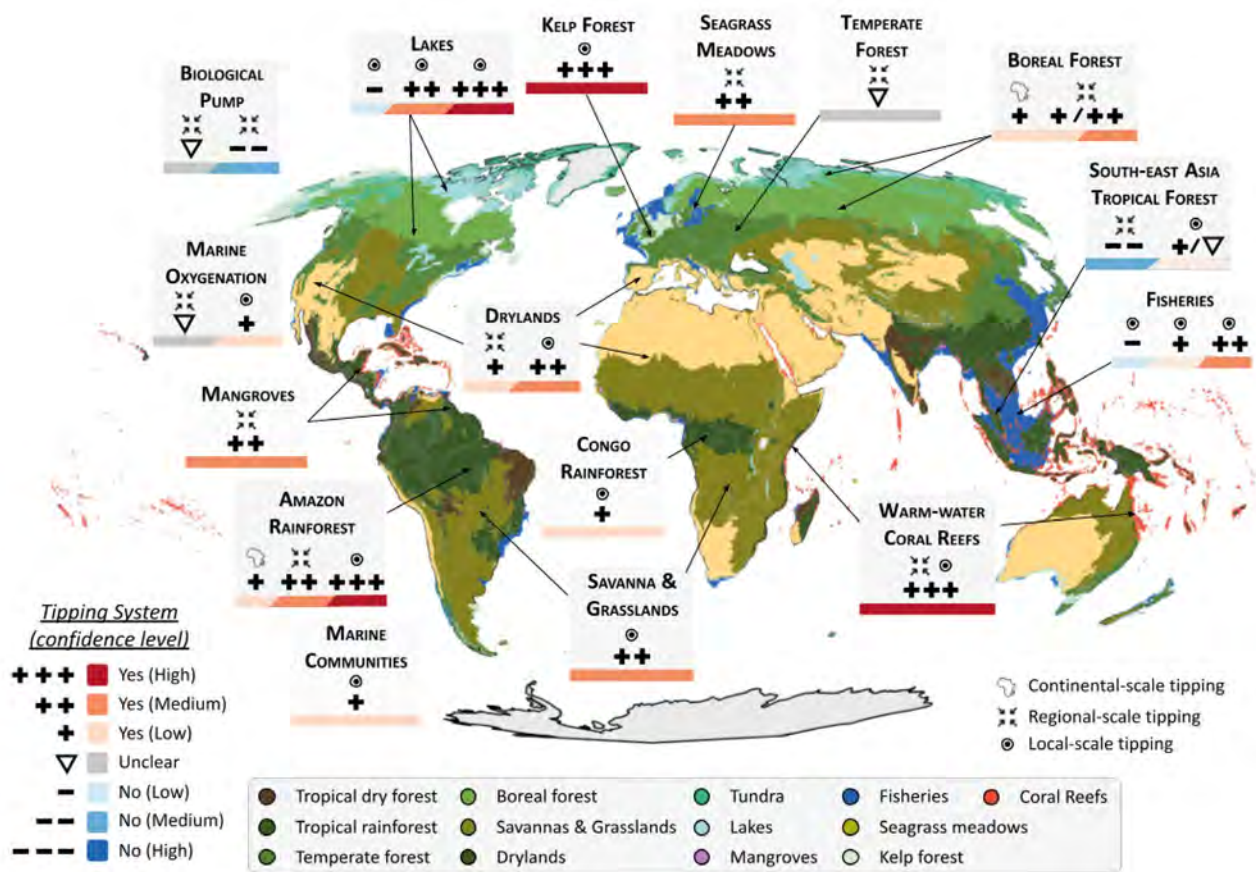
Quelle: PIK (2025, Erdsystem); basierend auf Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points)

Eine grundlegende Analyse von *Armstrong McKay et al.* (2022) zu Status und Dynamik der relevanten „Climate Tipping Points“ geht von „15 aktiven Kippelementen“ aus; diese werden unterteilt in 9 Kernelemente („nine core tipping elements“) sowie 7 regionale Wirkungselemente („seven regional impact tipping elements“).⁷⁷

Eine hierarchische Klassifikation relevanter Kippelemente in „Kern-Kippelemente“ sowie „regionale Kippelemente“ verwendet insbesondere das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).⁷⁸

Der *Global Tipping Points Report* (2023) der *University of Exeter* verwendet eine globale Synapse, die ebenfalls eine größere Anzahl „möglicher“ Kippelemente anführt, diese aber je nach Relevanz („continental“/„regional“/„local“) und Konfidenz der zugrundeliegenden Einschätzung („confidence level“) in unterschiedliche Kategorien einstuft.⁷⁹ (Vgl. dazu auch Abb. 12).

Abb. 12: Synapse globaler Klimakippunkte mit Wahrscheinlichkeitseinschätzung



Quelle: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report)

⁷⁷ Vgl. Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points): „Recent work has suggested that **up to 15 tipping elements** are now active.“; (Hervorhebungen im Original); dort unter Verweis auf: Lenton et al. (2019, Climate Tipping Points).

⁷⁸ Vgl. dazu: PIK (2025, Erdsystem); eine übersichtliche Darstellung findet sich auch bei: For Tomorrow (2024, Kippelemente).

⁷⁹ Vgl. dazu ausführlich: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 80.

Die Einordnung und Quantifizierung zentraler Kippunkte hängt unter anderem davon ab, ob deren Rolle im globalen Klimasystem schon hinreichend erforscht und verstanden (sowie modellierbar) ist. Konkret geht es also um die Frage, ob sich kritische Schwellenwerte mit hinreichender Treffsicherheit und Prognosegüte ermitteln lassen – gleichzeitig aber auch, welche Dimension und welchen „**Impact**“ das Umkippen bestimmter Teilsysteme für die Dynamik des globalen Klimasystems hätte.

- ▶ Da diese Fragen von der Klimaforschung noch nicht immer vollständig beantwortet werden können, wird im Verlauf dieser Analyse ein pragmatischer Ansatz zugrundegelegt, der eine Auswahl von **fünf kritischen „Climate Tipping Points“** sowie drei thematisch angrenzenden Klimaphänomenen (und möglichen Kippelementen) näher untersucht.⁸⁰

3.2.3 Der Beitrag moderner Simulationsverfahren zur Abschätzung von Klimarisiken

Grundsätzlich steht die Klimaforschung vor dem Problem, dass viele der bereits dargestellten Teilsysteme, Kippelemente und Kippunkte nicht eindeutig erfasst oder in ihren jeweiligen Auswirkungen bestimmt werden können. Dennoch gibt es in diesem Bereich zuletzt beeindruckende Fortschritte, so dass **bestimmte Einzelfragen** relativ genau analysiert und oft sogar mit relativ hoher Konfidenz prognostiziert werden können.⁸¹

Deutlich schwieriger sind hingegen die Modellierung und Simulation solcher Klimateffekte, die sich (mutmaßlich) gegenseitig beeinflussen und oftmals verstärken – und somit durch **multiple Interaktionen** sowie oftmals unklare Wechselwirkungen und Rückkopplungen geprägt sind.⁸²

- ▶ Wie die folgenden Kapitel zeigen, definieren jedoch genau solche **dynamischen und nichtlinearen Beziehungen** einen Großteil des globalen Klimasystems.⁸³

Nur auf Grundlage hochkomplexer Modelle und mit Hilfe äußerst leistungsfähiger Computer lassen sich überhaupt sinnvolle und aussagefähige Simulationen des globalen Klimasystems erstellen – einschließlich der zahlreichen „impliziten“ Kippunkte, Rückkopplungsschleifen und anderer schwer erfassbaren Nichtlinearitäten.⁸⁴

- ▶ Welche grundsätzlichen Anforderungen solche Verfahren stellen und welche Restriktionen und Limitationen damit einhergehen, skizziert nachfolgend *Nico Wunderling*, einer der führenden Experten für quantitative Erdsystemanalyse.

Erdsystemdynamiken: Kippunkte und ihre Wechselwirkungen

Prof. Dr. Nico Wunderling, Professor für Computational Earth System Sciences am Center for Critical Computational Studies (C³S) an der Frankfurter Goethe-Universität sowie Klimaforscher am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Das Klimasystem der Erde ist ein **komplexes Netzwerk miteinander gekoppelter physikalischer, chemischer und biologischer Systeme**. In diesem Zusammenhang spielen sogenannte *Kippelemente* (engl. *tipping elements*) eine zentrale Rolle. Dabei handelt es sich um Komponenten des Erdsystems, die bei Überschreiten bestimmter Schwellenwerte (*Kippunkte* oder engl. *tipping points*) **nichtlinear und häufig irreversibel** in einen neuen Zustand übergehen.⁸⁵

⁸⁰ Vgl. dazu weiterführend: unten, Kap. 5.1.

⁸¹ Vgl. in diesem Sinne etwa neuere Klimamodelle auf Grundlage des Ensembles *CMIP Phase 6 (CMIP6)*, die als relativ leistungsfähig gelten. (*CMIP* steht für *Coupled Model Intercomparison Project*), vgl. dazu: WCRP (2025, CMIP).

⁸² Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects) erklären dazu: „... *it remains an important problem to understand how the interactions between the tipping elements affect the overall stability of the Earth system.*“

⁸³ Vgl. dazu ausführlich: unten, Kap. 4-5.

⁸⁴ Vgl. dazu Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects): „... *current state-of-the-art Earth system models cannot yet comprehensively simulate the non-linear behaviour and feedbacks between some of the tipping elements due to computational limitation.*“ Vgl. zu diesem Thema grundlegend auch: Flato (2011, Models).

⁸⁵ Vgl. Lenton et al. (2008, Tipping); Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points); University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report).

- ▶ Diese Übergänge haben **tiefgreifende Auswirkungen** auf das regionale und globale Klima, aber auch auf unsere Gesellschaften im Allgemeinen.

Zu den identifizierten Kippelementen zählen unter anderem der Grönländische Eisschild, der Westantarktische Eisschild, der Amazonas-Regenwald, das Atlantische Meridionale Umwälzsystem (AMOC) sowie tropische Korallenriffe.⁸⁶

- ▶ Bereits bei einer **globalen Erwärmung von etwa 1,5°C** könnten einige dieser Elemente instabil werden.⁸⁷

Beispielsweise ist der Grönländische Eisschild besonders sensitiv gegenüber Temperaturanstieg und zeigt Anzeichen irreversiblen Massenverlusts,⁸⁸ was langfristig zu einem Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern (bis zu 7m) führen könnte. Auch der Westantarktische Eisschild oder der subpolare Wirbel könnten bereits bei einer globalen Erwärmung von 1,5°C kippen. Bei den Korallenriffen ist der Kippunkt laut Armstrong McKay et al. (2022) bei 1,5 Grad Celsius wahrscheinlich bereits überschritten.

Ein zentrales Forschungsfeld befasst sich mit den **Wechselwirkungen** zwischen den Kippelementen. Studien zeigen, dass einzelne Kippprozesse nicht unabhängig voneinander verlaufen, sondern über physikalische, biogeochemische und atmosphärische Rückkopplungen miteinander verknüpft sind.⁸⁹ So kann das verstärkte Abschmelzen von Grönlandeis durch Süßwassereintrag die AMOC abschwächen, was wiederum das Monsunsystem in Südamerika destabilisiert und damit den Wasserhaushalt des Amazonasgebiets verändert.

- ▶ Es hat sich gezeigt, dass solche **Interaktionen zwischen den Kippelementen** möglich werden ab Temperaturen von 1,5°C – und sicher eine relevante Rolle spielen ab 2,0°C globaler Erwärmung.

Insgesamt bergen solche Rückkopplungsprozesse (bzw. Wechselwirkungen) das Risiko sogenannter **Kippkaskaden**, bei denen das Kippen eines Elements das Kippen weiterer Elemente wahrscheinlicher macht.⁹⁰ Die Möglichkeit solcher Kaskaden wirft die Frage auf, ob das Erdsystem als Ganzes eine kritische Schwelle besitzt – eine Art *planetarer Kippunkt*, ab dem die globale Stabilität gefährdet ist.

Auch wenn aktuelle Erdsystemmodellierungen einen extrem selbstverstärkenden Erdsystemzustand (manchmal als *Hothouse Earth* deklariert⁹¹) als sehr unwahrscheinlich erscheinen lassen, ist das Risiko begrenzter selbstverstärkender Erwärmung erheblich und eine Drift hin zu höheren Temperaturen kann nicht ausgeschlossen werden, insbesondere wenn mehrere Kippelemente destabilisiert werden sollten. Nicht nur die Vielzahl positiver Rückkopplungsmechanismen (z.B. Auftauen des Permafrosts oder dunklere Oberfläche an Stellen, wo vorher Meereis war), sondern auch die Abschwächung wichtiger Kohlenstoffsinken wie sie sich aktuell schon zeigt (z.B. die Umwandlung des Amazonas von einer Kohlenstoffsinke zu einer Kohlenstoffquelle)⁹², sind daher ein Risiko für das Erdsystem insgesamt.

Die Implikationen für die langfristige Stabilität des Erdsystems sind gravierend: Während das Holozän – die aktuelle geologische Epoche der letzten ca. 12.000 Jahre – durch relativ stabile Klimabedingungen gekennzeichnet ist, könnte ein Überschreiten der Kippunkte einen Übergang in eine **neue, weniger lebensfreundliche Klimazone** einleiten. Ein solcher Zustand wäre durch weitreichende Umweltschäden, massive Meeresspiegelveränderungen und eine Gefährdung der ökologischen und gesellschaftlichen Stabilität gekennzeichnet⁹³ und hätte sehr wahrscheinlich auch massive Migrationsbewegungen zur Folge, nicht zuletzt auch, weil physiologische Limits des Menschen überschritten werden.⁹⁴

⁸⁶ Vgl. IPCC (2021, Climate); Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points).

⁸⁷ Vgl. Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points).

⁸⁸ Vgl. Stokes et al. (2025, Warming).

⁸⁹ Vgl. Kriegler et al. (2009, Tipping Points); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades).

⁹⁰ Vgl. Steffen et al. (2018, Trajectories); Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects).

⁹¹ Vgl. Steffen et al. (2018, Trajectories).

⁹² Vgl. Gatti et al. (2021, Amazonia); Turetsky et al. (2019, Permafrost); Nitzbon et al. (2024, Permafrost-Thaw); Wunderling et al. (2020, Global Warming).

⁹³ Vgl. IPCC (2021, Climate).

⁹⁴ Vgl. Lenton et al. (2023, Human Cost).

Angesichts dieser Risiken ist eine rasche und tiefgreifende **Reduktion** von Treibhausgasemissionen unerlässlich. Gleichzeitig sollten **Frühwarnsysteme** für Kippelemente entwickelt und Maßnahmen zur **Wiederherstellung** natürlicher Kohlenstoffsenken (u.a. Aufforstung) verstärkt werden.⁹⁵

- ▶ Die **Herausforderung** besteht nicht nur darin, den Klimawandel zu begrenzen, sondern vor allem darin, die **systemische Stabilität** (*systemic stability/resilience*) des gesamten Erdsystems zu erhalten.

Eine leicht verständliche Einführung in die Grundzüge der modernen Klimamodellierung bietet das nachfolgende Video des *World Climate Research Programme (WCRP)* zum „*Coupled Model Intercomparison Project*“. Hier geht's direkt zum Video:



3.3 Grundsätzliche Risikoszenarien und zeitliche Einordnung

Bereits die grundsätzliche Definition eines „*Klimakippunkts*“ geht davon aus, dass ein „*Umkippen*“ des jeweiligen Teilsystems (des „*Kippelements*“) eine erhebliche (oftmals katastrophale) Wirkung auf die planetare Klimadynamik hätte. Diese basale Logik, die stets auf das potentielle Ausmaß der globalen Erwärmung rekurriert, setzt einen klaren Rahmen für die **mögliche Brisanz daraus hervorgehender Risikoszenarien**:

- ▶ „Wir sehen, dass das Kipprisiko mit jedem Zehntelgrad zunimmt, mit dem wir die 1,5°C überschreiten. Wenn die globale Erwärmung auch noch 2°C übersteigt, würde das Kipprisiko noch schneller ansteigen. Das ist sehr besorgniserregend, da Szenarien, die sich an der gegenwärtig umgesetzten Klimapolitik orientieren, bis zum Ende dieses Jahrhunderts schätzungsweise zu einer **globalen Erwärmung von 2,6°C** führen werden.“⁹⁶

Dennoch unterliegt auch diese Grundlogik noch einer wichtigen Unschärfe: Diese ergibt sich aus dem Konzept der „*Komplexität*“ des Klimasystems, mit zahlreichen Interdependenzen, multiplen Rückkopplungseffekten sowie einer oftmals **nichtlinearen Systemdynamik**.⁹⁷

- ▶ Insbesondere hier zeigen sich wichtige Anknüpfungspunkte der Klimaforschung zur neuartigen und noch relativ jungen Disziplin der „*Komplexitätswissenschaft*“.⁹⁸



Auf der Erde sind alle Klimasubsysteme (...) eng miteinander verbunden und voneinander abhängig.

VDI (2024, Kaskadeneffekte)



Innerhalb der komplexen Systemdynamik des globalen Klimas verdient insbesondere das Konzept der sogenannten „*Kippkaskaden*“ besondere Beachtung. Der Begriff der Kippkaskaden beschreibt kumulative Phänomene und Ereignisse, die umgangssprachlich auch als **Dominoeffekte** bekannt sind:

⁹⁵ Vgl. Lenton et al. (2019, Climate Tipping Points); Boers (2021, Signals).

⁹⁶ Annika E. Högner, Klimaforscherin beim Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) sowie am IIASA Institute, anlässlich der Vorstellung einer ausführlichen Studie zu den wachsenden Risiken eines „Umkippens“ wichtiger Klimakippelemente; zitiert nach: Goethe-Universität Frankfurt (2024, Kipp-Risiken), (Hervorhebungen durch Verfasser); unter Einbeziehung der Originalstudie: Möller et al. (2024, Tipping Risks).

⁹⁷ In dieser oft verborgenen Systemdynamik liegt eine der zentralen Herausforderungen der modernen Klimaforschung. Vgl. dazu aber insbesondere die Ansätze des Klimaforschers Nico Wunderling, dessen Forschungsschwerpunkte am Frankfurter Center for Critical Computational Studies (C³S) im Bereich der „Erdsystemwissenschaften“ liegen und dabei die „Dynamik miteinander interagierender Kippelemente im Erdsystem“ explizit berücksichtigen; vgl. dazu: PIK (2025, Wunderling).

⁹⁸ Prägend dafür sind insbesondere die Arbeiten von W. Brian Arthur sowie diverse Forschungsprojekte des von ihm aufgebauten Santa Fe Institute in den USA; vgl. dazu etwa: SFI (2024, Complexity); Arthur (2014, Complexity).

- Das Auslösen eines einzelnen systemkritischen Kippunkts führt dabei zur schnellen Aktivierung weiterer gleichgerichteter Kippunkte in anderen Teilsystemen, denn: „Die Tipping Points wirken wie **Dominosteine in einem globalen System!**“⁹⁹

„Kippkaskaden“ oder auch „kaskadische Kippdynamiken“ sind dynamische Effekte innerhalb eines komplexen Systems, die aus inhärenten Wechselwirkungen und Rückkopplungen zwischen Teilsystemen resultieren. Die Aktivierung einzelner Kippunkte oder Kippmechanismen kann dabei weitere Kippmechanismen in anderen Teilsystemen auslösen oder deren Aktivierung beschleunigen.

Das Konzept der Kippkaskaden – auch bekannt als „**kaskadische Kippdynamiken**“ folgt somit wichtigen **Grundeigenschaften komplexer Systeme**, die durch inhärente **Wechselwirkungen** und **nichtlineare Effekte** geprägt sind. Mit Blick auf das globale Klimasystem resultieren daraus sehr klare – und keinesfalls beruhigende – Konsequenzen:

- „Das Konzept der Kippkaskaden illustriert die starke Vernetzung des Erdsystems und das Potential oft unvorhergesehener klimatischer und ökologischer Konsequenzen. So kann das Kippen eines Elements die Kippdynamiken anderer Elemente befördern.“¹⁰⁰

Beispiele für derartige Kippkaskaden sind etwa das Abschmelzen des grönländischen Eisschildes, das nicht nur das eigene Verschwinden in nichtlinearer Dynamik **progressiv**

beschleunigt, sondern gleichzeitig auch weitere Kippelemente – wie den Süßwassergehalt der Ozeane und damit auch die **Atlantische Zirkulation (AMOC)** – in Richtung kritischer Kippunkte verschiebt und beschleunigt.¹⁰¹ Zusätzlich werden weitere Risikofaktoren – wie der weltweite Anstieg des Meeresspiegels – deutlich verschärft, mit oftmals noch unklaren Ausprägungen und Folgewirkungen.¹⁰²

- Diese grundsätzliche Risikodynamik findet sich bei verschiedenen Kippelementen des globalen Klimasystems (vgl. dazu Abb. 13, S. 32).¹⁰³

Damit repräsentiert das Phänomen der **kaskadischen Kippdynamiken** eines der zentralen und am schwersten lösbaren Probleme des globalen Klimawandels. Denn:

- „Das Auslösen eines Kippunktes erhöht automatisch die Wahrscheinlichkeit und die Dynamik für das Auslösen weiterer Kippunkte – mit klar negativen Konsequenzen: Statt eines „nur“ linearen Fortschreitens der Erderwärmung und davon ausgelöster Klimaschäden resultiert eine **progressive Beschleunigung negativer Phänomene**, die zudem (zumindest für sehr lange Zeit) **praktisch irreversibel** sind.“¹⁰⁴

Viele der gegenseitigen Interdependenzen und theoretisch möglichen Kaskadeneffekte zwischen bestimmten Teilsystemen des Klimasystems sind derzeit jedoch noch Gegenstand der Forschung und oftmals nur unvollkommen modellierbar. Das erschwert im Einzelfall sowohl die Analyse und Prognose **konkreter Problemdimensionen** als auch der zugehörigen **zeitlichen Progressionspfade** – und damit implizit auch die Entwicklung aussagefähiger und **konsistenter Risikoszenarien**.

- Dies gilt umso mehr, wenn kritische Prozesse weder gleichmäßig noch graduell, sondern stattdessen **nichtlinear** – also deutlich progressiv oder sogar abrupt-sprunghaft – und im Ergebnis „**überraschend schnell**“ ablaufen.¹⁰⁵

⁹⁹ Rapp (2025, Big Picture), S. 41 (Hervorhebungen im Original).

¹⁰⁰ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), (Zitat mit geringfügiger sprachlicher Korrektur).

¹⁰¹ Vgl. dazu ausführlich: unten, Kap. 5.3.

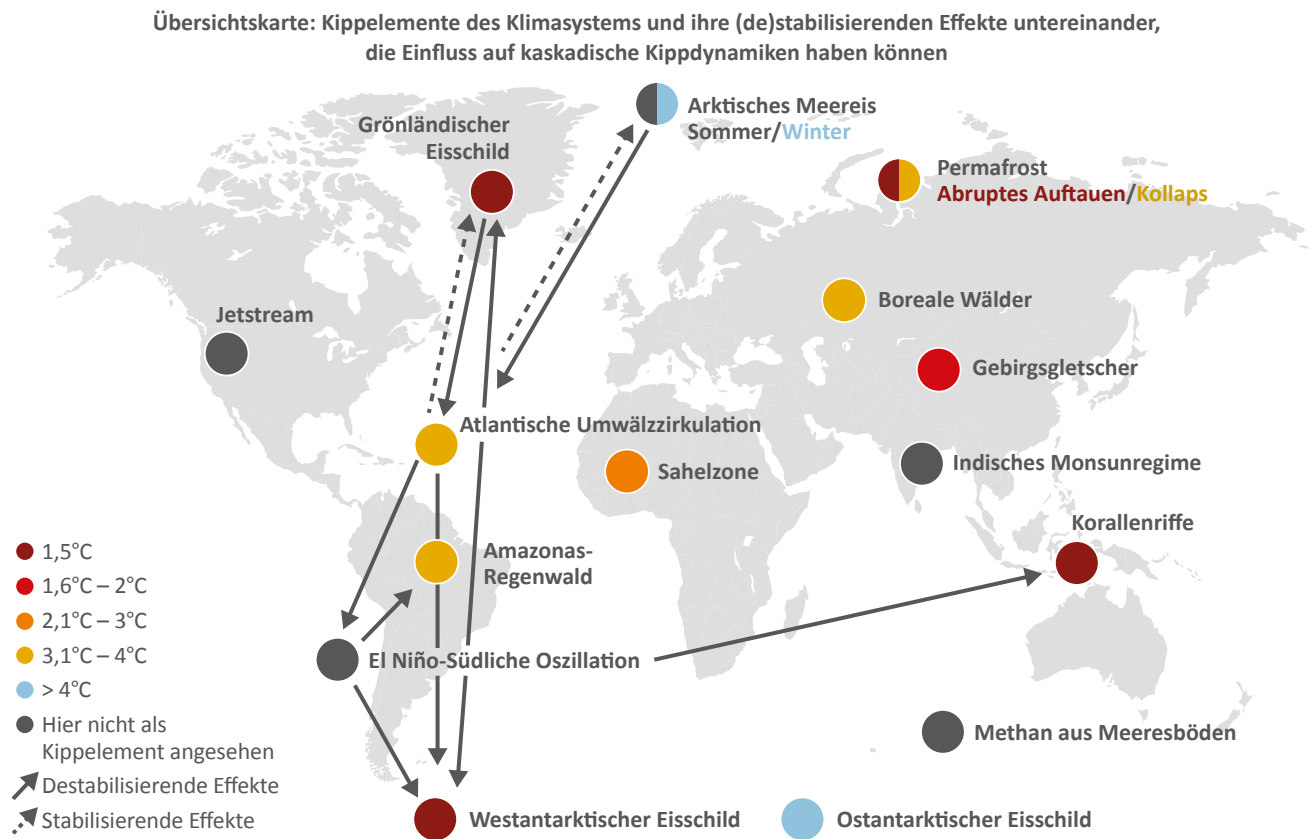
¹⁰² Vgl. dazu insbesondere: Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades); überblickartig auch: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken); sowie mit vielen Details: Kornhuber et al. (2024, Kippdynamiken). Zur grundsätzlichen Bedeutung progressiver Risikokaskaden vgl. bereits: Rapp (2021, Progression).

¹⁰³ Vgl. dazu ausführlich: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken).

¹⁰⁴ Rapp (2025, Big Picture), S. 41 (Hervorhebungen im Original).

¹⁰⁵ So ist nach Einschätzung des renommierten Klimaforschers *Rahmstorf* das schnelle Fortschreiten zentraler Risikofaktoren für die Nordatlantikströmung (AMOC) „*sehr überraschend*“; vgl. in diesem Sinne etwa: PIK (2024, Umwälzströmung); *Rahmstorf* (2024, Tipping Point); sowie zuletzt in: Spiegel (2025, AMOC), unter Bezugnahme auf *Drijfhout et al.* (2025, Shutdown): „Die Ergebnisse hätten ihn selbst ‚*schockiert*‘, schreibt der an der Studie beteiligte Forscher *Stefan Rahmstorf* vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.“

Abb. 13: Interaktionen zwischen Kippelementen und kaskadischen Kippdynamiken



Quelle: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken)

Trotz dieser grundsätzlichen Probleme bei der Bestimmung kritischer Zeitpfade gibt es inzwischen eine Vielzahl übereinstimmender Analysen und Modellierungen, die bei wichtigen *Tipping Points* sehr klar auf einen vergleichsweise **kurzen Zeithorizont** bis zum möglichen Umkippen hindeuten. Nach Aussage führender Klimaforscher liegt das kritische Zeitfen-

ter, innerhalb dessen ein ernsthaftes „Umkippen“ besonders relevanter Teilsysteme noch abgewendet werden könnte, überwiegend im Bereich eines **Zehnjahreszeitraums** – gerechnet allerdings vom Beginn der aktuellen Dekade, und nur falls entschlossene Gegenmaßnahmen unmittelbar und mit hoher Dinglichkeit eingeleitet würden.¹⁰⁶



Die nächsten zehn Jahre sind entscheidend.

Katja Matthes, Direktorin GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung, Kiel, 2021



¹⁰⁶ Vgl. dazu übereinstimmend: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); World Ocean Review (2024, Klimakrise).

So erklärt Katja Matthes, Direktorin des GEOMAR Helmholtz Zentrums für Ozeanforschung in Kiel:

- ▶ „Die nächsten zehn Jahre sind entscheidend“.¹⁰⁷

Analog dazu spricht auch das Umweltbundesamt (2023) von einer „kritischen Dekade“, in der die – aktuell noch unzureichenden – Klimaschutzbemühungen dringend nachgeschärft werden müssten.¹⁰⁸

Mit Blick auf die fortschreitende Erderwärmung wurde bislang für viele der besonders kritischen Kippunkte ein kritischer Schwellenwert von 1,5°C zugrunde gelegt. Wie neueste Klimastatistiken suggerieren, dürfte dieser Wert jedoch bereits in allernächster Zeit überschritten werden, sehr wahrscheinlich mit **wachsender Dynamik** und **großer Persistenz**:

- ▶ „Demnach könnten die Durchschnittstemperaturen schon in den nächsten fünf Jahren zeitweise die Marke von 1,5 Grad überschreiten.“¹⁰⁹

Analog dazu ermittelt auch der *Climate Change Tracker* (2025) nur noch eine **Wahrscheinlichkeit von knapp 50%**, um das wichtige 1,5-Grad-Ziel in den nächsten Jahren einhalten zu können.¹¹⁰ Allerdings sehen aktuelle Expertenschätzungen dafür inzwischen eine **signifikant geringere Wahrscheinlichkeit**, die eher im **Bereich von 10%** oder sogar darunter liegt.¹¹¹

Das deckt sich mit den Aussagen im jüngsten Synthesebericht von *IPCC* (2024), der eine Vielzahl relevanter Analysen zusammenführt; demnach wird mit großer Wahrscheinlichkeit „... das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Abkommens in den frühen 30er Jahren überschritten“.¹¹²

Auch ein Zwischenbericht der *Welt-Meteorologieorganisation* (WMO) aus dem Jahr 2024 zeigt ein **alarmierendes Bild des Klimawandels** („Alarmstufe Rot“), der mit hoher Geschwindigkeit voranschreitet und die Zeitspanne bis zum Auslösen wichtiger Klimakippunkte weiter verkürzt:

- ▶ „The WMO State of the Climate 2024 Update once again issues a **Red Alert** at the sheer pace of climate change in a single generation, turbo-charged by ever-increasing greenhouse gas levels in the atmosphere. 2015-2024 will be the warmest ten years on record; the loss of ice from glaciers, sea-level rise and ocean heating are accelerating; and extreme weather is wreaking havoc on communities and economies across the world.“¹¹³

Analog dazu befindet sich auch der jüngste WMO-Bericht aus dem Jahr 2025, dass wichtige Indikatoren des weltweiten Klimawandels zuletzt – mit 2024 als bislang wärmstem Jahr in der 175-jährigen Geschichte der Klimaaufzeichnungen – erneut **alarmierende Rekordwerte** erreicht haben („key climate change indicators again **reach record levels**“).¹¹⁴

Vergleichbare Aussagen trifft auch der jüngste Synthesebericht des *IPCC* (2024), der konstatiert:

- ▶ „Anhaltende Treibhausgasemissionen werden zu einer zunehmenden globalen Erwärmung führen, wobei 1,5°C in den betrachteten Szenarien und modellierten Pfaden laut bester Schätzung **in naher Zukunft erreicht wird**.“¹¹⁵

Selbst solche Klimakippunkte, die bislang als zeitlich noch eher weiter entfernt eingeschätzt wurden, speziell das drohende „Umkippen“ des nordatlantischen Strömungssystems (AMOC), zeigen zuletzt beunruhigende Veränderungen, die auf eine **deutliche Beschleunigung** der zugrundeliegenden Mechanismen hindeuten.¹¹⁶

¹⁰⁷ Matthes (2021, Jahre).

¹⁰⁸ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken); analog auch: Kornhuber et al. (2024, Kippdynamiken).

¹⁰⁹ Helmholtz (2022, 1,5-Grad-Ziel); unter Verweis auf den WMO-Bericht „WMO Global Annual to Decadal Climate Update“, WMO (2022, Update).

¹¹⁰ Vgl. dazu: Climate Change Tracker (2025, Indicators).

¹¹¹ Vgl. dazu etwa: 10insights (2025, Overshooting).

¹¹² Blome (2025, Wahrheiten), S. 151; unter Verweis auf IPCC (2024, Synthesebericht); (Zusammenfassung des entsprechenden „Syntheseberichts“ von 2023 in deutscher Sprache). Auch hier gehen neuere Analysen jedoch eher von einem „schnelleren“ Zeitfenster aus (2028-2031).

¹¹³ WMO (2024, Update); (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹¹⁴ WMO (2025, Climate); (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹¹⁵ IPCC (2024, Synthesebericht), (Zusammenfassung des entsprechenden „Syntheseberichts“ von 2023 in deutscher Sprache); (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹¹⁶ Vgl. dazu ausführlich und mit weiteren detaillierten Nachweisen: unten, Kap. 5.3.

Dieser Befund ist wenig überraschend, denn wie Abb. 14 auf Grundlage neuester Daten deutlich zeigt, hat sich der Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen in den letzten Jahren nicht nur fortgesetzt, sondern offenbar weiter beschleunigt.¹¹⁷

Noch deutlicher zeigt sich der Effekt einer **aktuellen Beschleunigung** der Erderwärmung – als „*Exceptional Warming Spike 2023/24*“ – in den speziell aufbereiteten Temperaturdaten von *Berkeley Earth* (2025), dort auch mit expliziter grafischer Darstellung.¹¹⁸ Hier geht's direkt zur Grafik „*Exceptional Warming Spike 2023/24*“:



Vor diesem hochdynamischen Gesamthintergrund warnt der Physiker und Regierungsberater *Lucht* (2024) eindringlich:

- ▶ „Das Klima wird dort bleiben, wohin wir es geschoben haben. Alle Erhitzungen, die wir jetzt produzieren, werden uns auf Jahrtausende erhalten bleiben. Wir können noch bewirken, dass es nicht schlimmer wird. Besser wird es aber nicht.“¹¹⁹



The existence of tipping points means that ‚business as usual‘ is now over.

University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report)



Gedanklich klar zu trennen von der Frage, wann erste wichtige Klimakippunkte tatsächlich unwiderruflich überschritten sein könnten, sind die **möglichen Folgen sowie die zeitliche Dimension der dadurch ausgelösten Veränderungen**.

- ▶ Beispielhaft sei hier jedoch angeführt, dass insbesondere das massive Ansteigen des Meeresspiegels – verursacht durch das beschleunigte Abschmelzen polarer und kontinentaler Eismassen – voraussichtlich bis zum **Ende des Jahrhunderts** anhalten wird.
- ▶ Gemäß Berechnungen von *IPCC* (2023) könnte der Meeresspiegel bis 2100 um 28 bis 55 Zentimeter steigen, was einen Großteil küstennaher Städte wie Hamburg, Amsterdam oder New York bereits massiv treffen würde – unter ungünstigen Szenarioannahmen sei aber auch ein Anstieg um annähernd 2 Meter (oder sogar deutlich darüber) nicht auszuschließen.¹²⁰

Abschließend ist hier festzuhalten:

Die Summe der gegenwärtigen Signale und Beobachtungen, Messwerte und Modellierungen sowie erkennbarer **prozyklischer Beschleunigungseffekte** deutet klar darauf hin, dass die Mehrzahl der aktuell als kritisch eingestuften Klimakippunkte bis zum **Ende dieser Dekade** (spätestens im Jahr 2035) erreicht (oder überschritten) und deren Kippdynamik damit „aktiviert“ sein dürfte – mit äußerst gravierenden und mehrheitlich **unumkehrbaren Konsequenzen!**

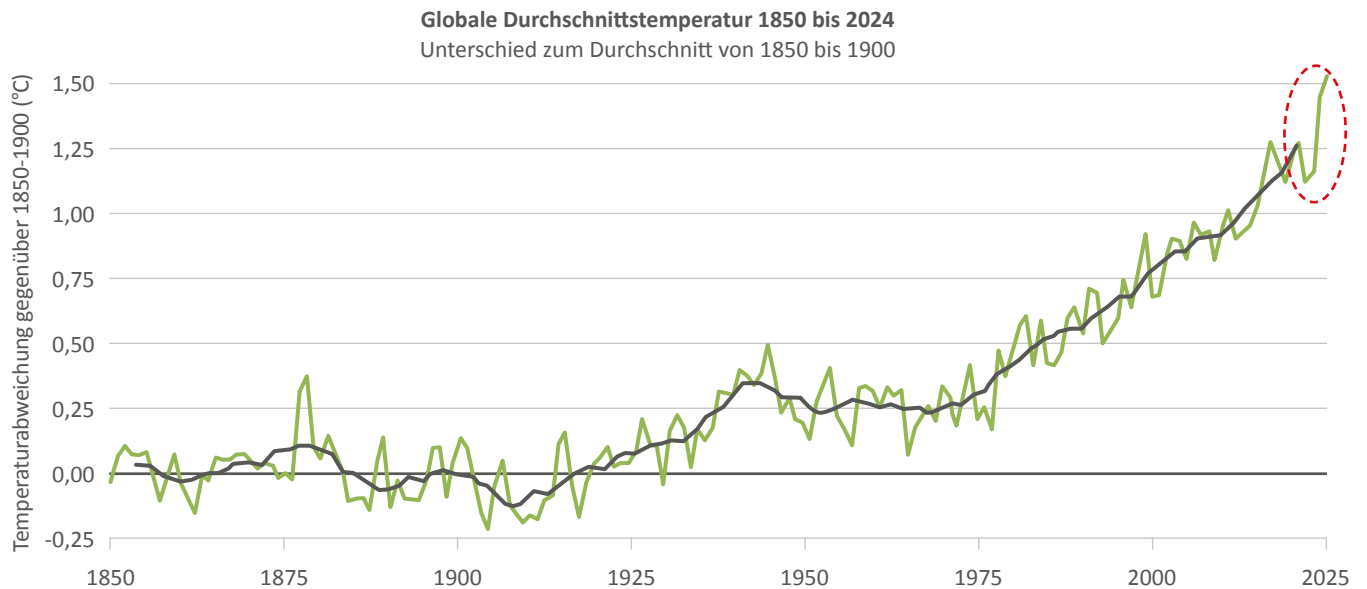
¹¹⁷ Vgl. dazu ausführlich: Forster et al. (2025, Indicators).

¹¹⁸ Vgl. dazu ausführlich: Berkeley Earth (2025, Temperature).

¹¹⁹ Wolfgang Lucht, Leiter der Forschungsabteilung für Erdsystemanalyse am *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)* und Inhaber des *Alexander von Humboldt-Lehrstuhls für Nachhaltigkeitswissenschaften* am *Geografischen Institut der Humboldt-Universität zu Berlin* sowie berufenes Mitglied des *Sachverständigenrats für Umweltfragen der Bundesregierung (SRU)*; zitiert nach: ntv (2024, Klimawandel).

¹²⁰ Vgl. dazu: *IPCC* (2023, Summary), (Summary for Policymakers), S. 17-18. Mit vergleichbaren Aussagen auch: Blome (2025, Wahrheiten), S. 163; bezugnehmend auf *IPCC* (2024, Synthesebericht).

Abb. 14: Rapide Beschleunigung der globalen Erwärmung in den letzten Jahren



Quelle: Forster et al. (2025, Indicators)

„Harmful tipping points in the natural world pose some of the gravest threats faced by humanity. Their triggering will severely damage our planet’s life-support systems and threaten the stability of our societies.“

University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report)

4 EIGENSCHAFTEN VON KLIMAKIPPUNKTEN

4.1 Modulation: Die Steuerung komplexer Systeme

Zum Verständnis der Relevanz sowie der grundsätzlichen Wirkungsweise von Klimakippunkten ist zwingend erforderlich, das globale Klima und dessen Veränderungen als **hochkomplexes System** zu begreifen. Komplexe Systeme sind stets durch das – meist nichtlineare – Zusammenwirken interdependenter Teilsysteme unter Einwirkung zahlreicher kritischer Systemparameter geprägt.¹²¹

Aufgrund dieser Grundeigenschaften zeigen komplexe Systeme regelmäßig signifikante Veränderungen ihrer Systemeigenschaften, wobei ein vorheriger „stabiler“ Zustand oftmals abrupt in einen neuen „fragilen“ Zustand übergeht – der aber auch als länger anhaltende und sehr dynamische **Anpassungsphase** definiert sein kann. Die **sprunghaften Wechsel** zwischen unterschiedlichen Systemzuständen sowie der Versuch, durch anhaltende dynamische Veränderungen zu einem neuen Systemgleichgewicht zu finden, sind regelmäßig Ausdruck und Ergebnis **nichtlinearer Prozesse**.¹²²

Oder in der Sprache der Komplexitätstheorie formuliert:

- ▶ „Komplexe Systeme haben eine **emergente Eigenschaft**, die den Teilen des Systems nicht inhärent ist.“¹²³

Auslöser solcher nichtlinearer Prozesse sind typischerweise **kritische Schwellenwerte** bestimmter Parameter des Systems, deren Überschreitung komplexe Folgewirkungen, Eigendynamiken und Rückkopplungsmechanismen auslöst. Genau diesem Grundprinzip folgt auch das globale Klimasystem mit seinen zahlreichen implizit „eingebauten“ **Schwellenwerten und Kippunkten**.¹²⁴



Bereits das Überschreiten einzelner Kippunkte hat weitreichende Umweltauswirkungen, welche die Lebensgrundlage vieler Menschen gefährden. Es besteht zudem das Risiko, dass durch Rückkopplungsprozesse weitere Kippunkte im Erdsystem überschritten werden und so eine dominoartige Kettenreaktion ausgelöst wird.

PIK (2025, Erdsystem)



Vor diesem Hintergrund erklärt GEOMAR (2025) zur grundsätzlichen Systemdynamik des Klimas:

- ▶ „Alle Bestandteile des Klimasystems sind auf vielfältige Weise miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. Inzwischen hat man viele Prozesse verstanden, das Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren ist aber derart komplex, dass noch immer viele Fragen offen sind.“¹²⁵

Grundsätzlich unterliegt das Klima einer Vielzahl **natürlicher Einflussfaktoren**, wozu insbesondere vulkanische Aktivitäten oder andere planetare Mechanismen zählen. Davon ausgehende Veränderungen des globalen Klimasystems können

¹²¹ Vgl. dazu etwa die grundsätzlichen Ausführungen zur Natur komplexer Systeme bei: Gospodinov (2023, Systeme); sowie analog bereits bei: Waldrop (1993, Complexity); sowie: Arthur (2014, Complexity).

¹²² Zu den grundsätzlichen Eigenschaften und Wirkungsweisen nichtlinearer Prozesse, die auch prägend für die wissenschaftliche Fundierung der sogenannten „Chaostheorie“ sind, vgl. etwa: Sornette (2009, Phenomena); sowie grundlegend bereits: Mandelbrot (1990, Fractal).

¹²³ Gospodinov (2023, Systeme), S. 2; (Hervorhebungen durch Verfasser). Als „emergente Eigenschaft“ oder „Emergenz“ bezeichnet die Komplexitätstheorie bestimmte Manifestationen eines komplexen Systems, die als „neuer“ Systemzustand aus interdependenten Veränderungen und Neuordnungen des Systems hervorgehen.

¹²⁴ Vgl. dazu grundsätzlich: GEOMAR (2025, Klimasystem). Weiterführend dazu auch: Bildungsserver Hamburg (2025, Klimasystem).

¹²⁵ GEOMAR (2025, Klimasystem).

durchaus längerfristig wirken – wie etwa die globale Abkühlung 1991 nach Ausbruch des Vulkans *Pinatubo* oder die mehrjährige Abkühlungsphase nach einem massiven Vulkanausbruch im Jahr 536.¹²⁶

Bislang blieben derartige Ereignisse jedoch räumlich und zeitlich eher begrenzt, so dass die grundsätzliche Stabilität des globalen Klimasystems dadurch **nicht nachhaltig beeinträchtigt** wurde.

- ▶ Mit der anthropogenen Erwärmung der letzten 100 Jahre – als Folge vom Menschen verursachter massiver Eingriffe ins Klimasystem – scheint dies jedoch nicht länger zu gelten.

Erstmals nähert sich das globale Klimasystem in vielen wichtigen Bereichen den kritischen Schwellenwerten, die nach heutigem Erkenntnisstand ein „Umkippen“ bisheriger – relativ stabiler – Systemzustände in eine **neue Phase massiver erhöhter Systemdynamik** nach sich ziehen werden.

- ▶ Die Rolle und die Funktion der zugehörigen Kippunkte ist dabei ganz offensichtlich die „**Modulation**“ (ein freundlicheres Wort für „*Umbruch*“) des Klimasystems von einem vorherigen Systemzustand hin zu einer **nachfolgenden nichtlinearen Dynamik** – mit zahlreichen prozyklischen und selbstverstärkenden Folgewirkungen.¹²⁷

4.2 Dynamik: Die Rolle kritischer Schwellenwerte

Bei der Erforschung und Simulation komplexer Systeme zeigt sich stets eine charakteristische Grundeigenschaft: Ein dynamisches (manchmal auch „chaotisches“) **Aufschaukeln des Systems**, nachdem einzelne Systemparameter **kritische Schwellenwerte** erreicht oder überschritten haben.¹²⁸

- ▶ Das „Auslösen“ solcher Schwellenwerte erzeugt dann eine **oftmals unkontrollierbare Dynamik**, die durch ein Zusammenspiel **nichtlinearer Effekte** und sich gegenseitig verstärkender **Rückkopplungsschleifen** geprägt ist.

- ▶ Analog zum Grundprinzip komplexer Systeme werden diese Schwellenwerte dann zu „**kritischen Kippunkten**“, die das gesamte System und dessen Dynamik entscheidend verändern – oftmals überraschend schnell und durch **sprunghafte Anpassungsprozesse**.

Genau in dieser Eigenschaft komplexer Systeme liegt aus heutiger Sicht ein sehr wichtiges – und oftmals wohl noch immer unterschätztes – Problem, das zwingend und unmittelbar mit dem Phänomen der „kritischen Kippunkte“ einhergeht: Sind einzelne Kippunkte erst einmal ausgelöst, ist die nachfolgende Dynamik meist irreversibel und kaum noch wirksam kontrollierbar.

- ▶ Gleichzeitig kann der Übergang in einen neuen Systemzustand **oftmals sprunghaft** erfolgen – sich also abrupt und mit enormer Schnelligkeit vollziehen.¹²⁹

Für viele der bisher bekannten Kippunkte wird als **kritischer Grenzwert** das Ziel des Pariser Klimaabkommens von 2015 unterstellt – also eine **globale Erwärmung von 1,5 bis maximal 2°C** gegenüber dem vorindustriellen Niveau. Dieser Wert (der im Jahr 2024 bereits erstmals erreicht wurde!) muss jedoch als **grobe Approximation** gelten und ist keinesfalls präzise gesichert.

Folglich besteht die Möglichkeit, dass wichtige Kippunkte und Kippdynamiken – etwa der polaren Eisschilde oder der Permafrostböden – bereits deutlich früher ausgelöst wurden.¹³⁰

¹²⁶ Vgl. dazu ausführlich: GEOMAR (2019, Vulkane): „Eine großräumige Abkühlung nach Vulkanausbrüchen erfolgt, wenn diese große Mengen an Schwefelgasen in die Stratosphäre transportieren.“ Beispielhaft dort: „Der Ausbruch des *Pinatubos* im Jahr 1991 hatte erhebliche Auswirkungen auf das Klima und senkte die globale Durchschnittstemperatur um etwa 0,5 Grad.“; „Die stärkste Abkühlungsperiode der vergangenen 2500 Jahre auf der Nordhalbkugel begann mit einem extratropischen Vulkanausbruch im Jahr 536 n. Chr.“

¹²⁷ Vgl. dazu weiterführend die Aussagen des nächsten Kapitels.

¹²⁸ Vgl. dazu die zahlreichen übereinstimmenden Nachweise aus dem Gebiet der *Chaostheorie* sowie der *Komplexitätsforschung*.

¹²⁹ Diese grundlegende Botschaft der Komplexitätsforschung sollte im Bereich der Klimamodelle noch weitaus stärker als möglicher Risikofaktor berücksichtigt werden.

¹³⁰ Vgl. dazu ausführlich bei der Darstellung der jeweiligen Kippelemente und Kippdynamiken: unten, Kap. 5.

Mit Blick auf das globale Klima und dessen systemische Veränderung wurden offenbar in vielen Bereichen relevante Schwellenwerte bereits erreicht oder überschritten:

- ▶ Dies gilt insbesondere für das beschleunigte **Abschmelzen großer Eismassen** in der Arktis sowie in Grönland, aber offenkundig auch bei vielen Gletschern in Europa und Asien.¹³¹
- ▶ Auch die massive **Erwärmung der Ozeane** sowie die damit einhergehende **Übersäuerung** – mit einem großflächigen Absterben tropischer Korallenriffe – scheinen bereits eine kritische Schwelle erreicht oder sogar überschritten zu haben.¹³²

Wichtigster Einzelfaktor ist dabei ganz offensichtlich das **Ausmaß der globalen Erwärmung**, das direkt oder indirekt auf eine **Vielzahl kritischer Kippunkte** im globalen Klimasystem einwirkt. Davon abgeleitete Faktoren sind etwa die Veränderungen ozeanischer Parameter – wie insbesondere Wassertemperatur und Süßwassergehalt – sowie der Aufbau ozeanischer Schichtungs- und Strömungsverläufe, die jeweils nachgelagerte Kippvorgänge in Gang setzen können.¹³³

- ▶ Im Einklang mit zentralen Erkenntnissen der Komplexitätsforschung ist somit zu erwarten, dass bereits **relativ zeitnah** und mit oftmals **überraschender Geschwindigkeit** signifikante Veränderungen des globalen Klimasystems eintreten – oder bereits in Gang gesetzt wurden!

Dieser Aspekt wird durch neuere Forschungsergebnisse tendenziell bestätigt. Dabei ermöglichen komplexe Modellierungen immer bessere Schätzungen für die **thermische Sensitivität einzelner Kippelemente** – und damit für ein mögliches Auslösen kritischer Klimakippunkte:

- ▶ Hieraus lässt sich eine **temperaturbasierte Risikokala** erstellen, die den jeweiligen Sensitivitätsgrad einzelner Kippelemente – also das „Näherrücken“ spezifischer Kippunkte – in Abhängigkeit vom Niveau der Erderwärmung sowie von den jeweils gültigen oder zugrunde gelegten *Emissions-szenarien* und *Erwärmungspfaden* veranschaulicht.¹³⁴ (Vgl. dazu beispielhaft die Darstellung in Abb. 15).

Anhand dieser Darstellung wird deutlich, dass sich einige wesentliche Kippelemente – wie etwa die polaren Eisschilde sowie die Korallenriffe – mindestens im Anfangsstadium ihrer „kritischen Zone“ befinden, möglicherweise aber auch schon irreversible Umkippprozesse eingeleitet haben. Weitere wichtige Kippelemente, darunter der Amazonas-Regenwald, könnten (je nach Dynamik der weiteren Erderwärmung) ebenfalls schon bald kritische Schwellenwerte erreichen und in ihren jeweiligen „Kippbereich“ übergehen.¹³⁵

Derartige Analysen werden allerdings dadurch erschwert, dass bestimmte Kippunkte sowie deren Funktion und Wirkungsweise innerhalb des Systems entweder noch nicht voll verstanden sind, was tendenziell zu einer „Unterschätzung“ beiträgt, oder dass deren wahrer Zustand sowie das „echte“ Niveau kritischer Schwellenwerte durch überlagernde Effekte und systemimmanente „Trägheitsfaktoren“ verschleiert werden.

- ▶ Einer dieser **Trägheitsfaktoren** liegt in der Rolle der Ozeane: Diese bedecken rund 70% der Erdoberfläche und wirken dabei als riesiger „Zwischenspeicher“ – sowohl für CO₂ als auch für einen Großteil der globalen Erwärmung.¹³⁶
- ▶ *World Ocean Review* (2010) konstatiert: „Die Ozeane (...) reagieren träge auf Veränderungen in der Atmosphäre und nehmen neben der Wärme große Mengen des von uns Menschen produzierten Klimagases Kohlendioxid auf.“¹³⁷

¹³¹ Vgl. dazu: Rounce et al. (2023, Glacier); Asakawa (2025, Dach); Euronews (2025, Gletscher).

¹³² Vgl. in diesem Sinne etwa: World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf): „Eine der wichtigsten chemischen Veränderungen im Zuge der steigenden Kohlendioxidaufnahme des Weltozeans ist die zunehmende Versauerung.“

¹³³ Vgl. dazu ausführlich und weiterführend: unten, Kap. 5.5. Grundsätzlich dazu auch: World Ocean Review (2010, Weltmeere).

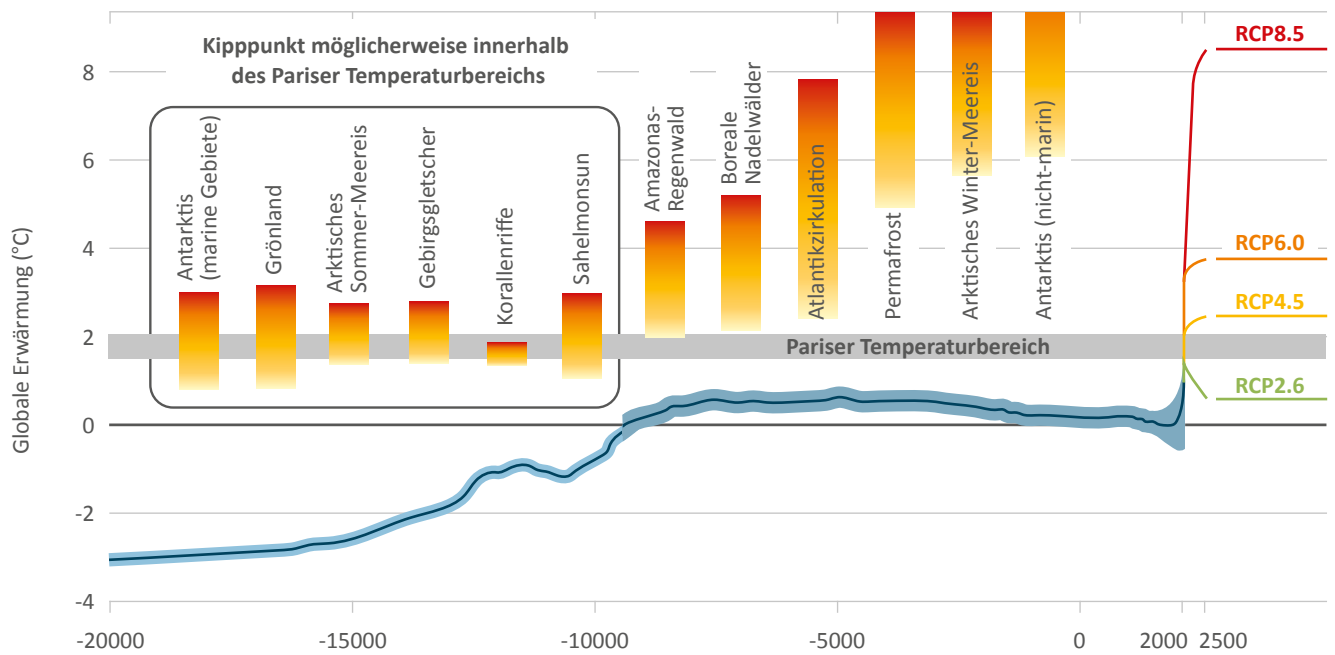
¹³⁴ Vgl. dazu ausführlich: PIK (2019, Kippunkte).

¹³⁵ Vgl. dazu auch explizit den aktuellen Expertenkommentar des Erdsystemforschers Nico Wunderling: unten, Kap. 4.6.

¹³⁶ Vgl. dazu ausführlich auch: unten, Kap. 5.5.

¹³⁷ World Ocean Review (2010, Klimasystem).

Abb. 15: Kritische Temperaturbereiche für das Auslösen wichtiger Kippunkte



Quelle: Rahmstorf et al. (2019, Kippunkte); (Temperaturdaten teilweise überholt)

Diese **inhärente Trägheit des Klimasystems** verdeckt oftmals den Blick für die tatsächlichen Risiken und Effekte der globalen Klimaveränderung – insbesondere aber auch für die **Relevanz kritischer Schwellenwerte** und das „Näherrücken“ entsprechender Kippunkte.

Dennoch gilt dabei eine zentrale – und wenig beruhigende – Feststellung: „Die Trägheit des Klimas wird dazu führen, dass sich selbst lange nach der Stabilisierung der CO₂-Konzentration das Klima weiter verändern wird.“¹³⁸

Mit Blick auf die klimatischen Trägheitseffekte warnt eindringlich auch *World Ocean Review* (2010):

- „Die heute bereits messbaren Auswirkungen des Klimawandels zeigen in keiner Weise das ganze Ausmaß der bisher durch den Menschen verursachten Klimaänderung. Die Menschheit wird sie **erst in einigen Jahrzehnten** deutlicher zu spüren bekommen.“¹³⁹

Vor diesem Hintergrund sollte die weitere Erforschung kritischer Klimakippunkte mit hoher Priorität vorangetrieben werden, um schnellstmöglich mehr über deren **grundlegende Dynamik**, **zeitliche Relevanz** und **systemische Kritikalität** innerhalb des Klimasystems in Erfahrung zu bringen.

- Entscheidend ist dafür vor allem auch ein grundlegendes Verständnis für das **Phänomen der Nicht-linearität**, das im Klimasystem in vielfältiger Weise auftritt – und über direkte und indirekte Rückkopplungen schnell eskalierende **Kaskadeneffekte** auslösen kann.

¹³⁸ World Ocean Review (2010, Klimasystem).

¹³⁹ World Ocean Review (2010, Weltmeere), (Hervorhebungen durch Verfasser), S. 15.

4.3 Nichtlinearität: Das Phänomen der Kaskadeneffekte

Wie bereits an anderer Stelle ausgeführt wurde, folgt das globale Klimasystem typischen Prinzipien einer **komplexen Systemdynamik**, die durch zahlreiche eng miteinander verbundene Selbstverstärkungs- und Rückkopplungsmechanismen geprägt wird.

- Genau diese Grundcharakteristik ist verantwortlich für die **Eigenschaft der Nichtlinearität**, die in vielen Bereichen des Klimasystems deutlich zu beobachten ist.¹⁴⁰

Zu den typischen Ausprägungen einer solchen Dynamik zählt das Auftreten **interdependenter Kausalitäten**, die auch als **Kaskadeneffekte** bekannt sind. In komplexen Systemen entstehen derartige Effekte typischerweise durch das „**Überschießen**“ eines oder mehrerer Systemelemente über einen kritischen Grenzwert, wodurch dann – direkt oder indirekt – auch andere Systemelemente „**angeregt**“ und nachfolgend „**getriggert**“ werden, was letztlich zu einem unkontrollierbaren „**Aufschaukeln**“ des gesamten Systems führt.

- Ein Beispiel dafür, das nicht aus der Klimaforschung stammt, aber ebenfalls auf eine **nichtlineare Kaskade** sich gegenseitig verstärkender Phänomene zurückgeht, ist die „**Große Finanzkrise**“ von 2007 bis 2009.¹⁴¹

Innerhalb typischer Risikokaskaden resultiert von Stufe zu Stufe oftmals eine **prozyklische Verschärfung** der Systemdynamik: Die Kaskadeneffekte erzeugen dann **immer stärkere Ausschläge des Systems** – mit immer weiter reichenden Auswirkungen und potentiell stark zunehmenden Risikorealisationen (vgl. dazu die Erklärungen in der nachfolgenden Textbox).

Ein **prozyklischer Kaskadeneffekt** beschreibt einen Prozess, bei dem sich ein bestehender Trend durch aufeinanderfolgende, sich verstärkende Stufen weiter beschleunigt.¹⁴²

Prozyklische Kaskadeneffekte beschreiben eine Situation, in der wirtschaftliche oder soziale Prozesse in einer Weise ablaufen, die eine anfängliche Störung oder Veränderung verstärkt und zu einer **Kaskade von weiteren, sich verstärkenden Effekten** führt. Dies geschieht, indem eine anfängliche Schwächung oder ein Ausfall in einem Bereich zu weiteren Ausfällen oder Schwächungen in verbundenen Bereichen führt, wodurch sich der ursprüngliche Effekt verstärkt und ausweitet.¹⁴³

Mit Blick auf das globale Klimasystem zeigen sich hier zahlreiche Parallelen: „**Kaskadische Kippdynamiken**“ werden von der modernen Klimaforschung zwar immer mehr als **gravierende Risikotreiber** erkannt, sind allerdings hinsichtlich ihrer Wirkungen und gegenseitigen Interdependenzen noch nicht immer vollständig erschlossen.¹⁴⁴

Grundsätzlich gilt dabei jedoch:

- „So kann das Kippen eines Elements die Kippdynamiken anderer Elemente befördern oder auslösen. (...) Dabei besteht das Risiko, dass **sich-selbst-verstärkende Dynamiken** zwischen verschiedenen Erdsystemelementen ausgelöst werden, welche eine **irreversible und rasche Änderung des Systemzustands** zur Folge haben können.“¹⁴⁵

Entsprechend warnt – mit „*very high confidence*“ – auch der **Weltklimarat IPCC (2023)**:

- „Risks and projected adverse impacts and related losses and damages from climate change **escalate with every increment of global warming**.“¹⁴⁶

¹⁴⁰ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, vorangegangene Abschnitte und Kap. 3.2.1 sowie 4.1-4.6.

¹⁴¹ Vgl. dazu etwa: bpb (2024, Finanzkrise): „*Welche Kettenreaktionen möglich sind, zeigte die Pleite der Investmentbank Lehman Brothers.*“; sowie: Perplexity (2025, Finanzkrise): „*Der Begriff ‚Dominoeffekt‘ beschreibt in der Finanzkrise eine Kettenreaktion, bei der der Ausfall oder die Krise eines Marktteilnehmers (z.B. einer Bank oder eines Immobilienunternehmens) weitere Ausfälle nach sich zieht. Ein bekanntes Beispiel ist die globale Finanzkrise 2007/2008.*“

¹⁴² Begriffsdefinition nach: Perplexity (2025, Kaskadeneffekt); (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹⁴³ Google Gemini (2025, Kaskadeneffekte); (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹⁴⁴ Wegweisend hierfür sind aber die Arbeiten von Wunderling (2021, Dynamiken); Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects); sowie Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades).

¹⁴⁵ Kornhuber et al. (2024, Kippdynamiken), (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹⁴⁶ IPCC (2023, Statements), (Hervorhebungen durch Verfasser).

Wichtige Einzelbeispiele für derartige Kaskadeneffekte beim Klima sind etwa:

- Das **Abschmelzen der Polkappen**, wodurch der Meeresspiegel ansteigt und sich zugleich der Süßwassergehalt der Ozeane verändert, was weitere Klima-Rückkopplungen auslöst.
- Das **Auftauen von Permafrostböden**, wodurch Methan in großen Mengen freigesetzt wird, das wiederum ganz erheblich zu einer Beschleunigung der Erderwärmung beiträgt.
- Das **Abholzen der Regenwälder** am Amazonas, wodurch globale Kapazitäten zur CO₂-Transformation massiv reduziert und zugleich essentiell wichtige Biotope zerstört werden.
- Die **Erwärmung der Ozeane**, wodurch sich große Meeresströmungen sowie die maritime Flora und Fauna verändern, was eine Vielzahl nachfolgender (negativer) Kaskadeneffekte auslösen kann – insbesondere für Biodiversität und globale Nahrungsketten, aber auch für planetarische Wettermuster und übergeordnete Klimabedingungen.¹⁴⁷

In all diesen grundlegenden Klimamechanismen ist das **Element der Nichtlinearität** von absolut zentraler Bedeutung:

- ▶ Es **verstärkt** und **beschleunigt** einzelne Effekte und (scheinbar unzusammenhängende) Wirkungsmechanismen – und **verbindet** diese in oftmals sehr dynamischen (meist gleichgerichteten) **Kettenreaktionen** und **Kaskadeneffekten**.
- ▶ Es führt damit zu einer **erheblich stärkeren Volatilität und Vulnerabilität** des gesamten Klimasystems als oftmals unterstellt.

4.4 Dominoeffekte: Die Bedeutung multipler Interdependenzen

Innerhalb des globalen Klimasystems ist das Phänomen **kaskadierender Dominoeffekte** an vielen der kritischen Kippelemente von besonderer Relevanz. Es resultiert aus **multiplen Interdependenzen** innerhalb des Systems, die sich gegenseitig beeinflussen (oft sogar verstärken) und dabei eine **dynamische und progressive Ereignissequenz** in Gang setzen. Ihre Wirkungsweise basiert auf kritischen Nichtlinearitäten des Systems und entspricht im Wesentlichen den bereits beschriebenen **Kaskadeneffekten**.¹⁴⁸

Das Prinzip der Dominoeffekte besagt, dass adverse Entwicklungen eines Teilsystems – ausgelöst durch ein Überschreiten bestimmter Schwellenwerte – nahezu zwangsläufig auf andere Teilsysteme einwirken und dort ebenfalls Störungen bisheriger Systemgleichgewichte verursachen, die dann wiederum auf andere Teilsysteme ausstrahlen – und so fort. Diese Grundmechanik ist mit dem Umkippen von hintereinander angeordneten Dominosteinen vergleichbar (vgl. Textbox).



Das Klimasystem ist wie eine Reihe von Dominosteinen.

Nico Wunderling, Professor am Center for Critical Computational Studies (C³S), Frankfurt, 2025



Der **Dominoeffekt** bezeichnet eine Kettenreaktion, bei der ein einzelnes Ereignis eine Reihe weiterer, ähnlicher oder identischer Ereignisse auslöst – jedes Ereignis ist dabei Ursache für das nächste, und alle lassen sich auf das ursprüngliche Anfangsereignis zurückführen. Der anschauliche Begriff stammt vom Dominospiel: Stellt man Dominosteine in einer Reihe auf und stößt den ersten um, fallen nacheinander auch alle weiteren Steine.

¹⁴⁷ Vgl. zu den einzelnen Aspekten überblickartig: Kornhuber et al. (2024, Kippdynamiken); sowie ausführlich: entsprechende Abschnitte und Kapitel der vorliegenden Analyse.

¹⁴⁸ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 4.3.

Mit Blick auf das globale Klimasystem sind derartige Dominoeffekte von besonderer Bedeutung, da sie die Auswirkungen eines einzelnen Einflussfaktors durch Übertragung und Ausstrahlung auf andere Einflussfaktoren und Teilsysteme massiv verstärken oder sogar potenzieren können.

Genau hier liegt das Grundproblem des aktuellen Klimawandels:

- ▶ Der Einzelfaktor „Treibhausgasemission“ erzeugt einen messbaren Temperaturanstieg und führt (als „Treibhauseffekt“) direkt zum Phänomen der globalen Erwärmung.
- ▶ Dieser Effekt verändert das System grundlegend und wirkt auf eine **Vielzahl miteinander verbundener Teilsysteme**, die dann weitere systemische Veränderungen auslösen.¹⁴⁹

Ein prominentes Beispiel für solche Dominoeffekte ist das Abschmelzen polarer Eisschilde, denn:

- ▶ „Das weltweite **Abschmelzen großer Eisflächen** (Grönland, Polkappen) führt nicht nur zur Anhebung des Meeresspiegels, sondern hat noch eine zweite **entscheidende Nebenwirkung**: Auf die Erde einwirkende Sonneneinstrahlung wird immer weniger zurückreflektiert, was das Ausgangsproblem der Erderwärmung **progressiv verstärkt und weiter beschleunigt**.“¹⁵⁰
- ▶ Hinzu kommen zahlreiche weitere Folgewirkungen, wie etwa eine tiefgreifende Veränderung **ozeanischer Schichtungs- und Strömungsverläufe** sowie **atmosphärischer Windsysteme**.¹⁵¹

Diese multiplen Interdependenzen – speziell mit Blick auf die polaren Eisschilde – werden durch Ergebnisse einer neuartigen **Netzwerkanalyse** bestätigt, durchgeführt 2021 am *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)*:

- ▶ „Kipp-Elemente im Erdsystem können sich gegenseitig destabilisieren, mit dem Risiko von **Klima-Domino-Effekten**, wenn die globale Erwärmung weiter voranschreitet. Die Eisschilde auf Grönland und der Westantarktis sind hierbei mögliche Ausgangspunkte für Kippkaskaden.“¹⁵²

Weitere Beispiele betreffen die **Übersäuerung der Ozeane** durch CO₂, die unmittelbare Auswirkungen auf die ozeanische Flora und Fauna und somit auf wichtige Lebensgrundlagen der Menschheit hat, oder das **Abtauen kontinentaler Gletscher**, das nicht nur die Topographie ganzer Regionen bedroht, sondern auch die dortigen Lebensbedingungen radikal verändert.¹⁵³

Das jeweilige Grundmuster ist dabei stets identisch: Ausgehend von einem einzelnen Faktor wird über **multiple Interdependenzen** eine ganze Kette zeitgleicher oder nachgelagerter „**Dominoeffekte**“ ausgelöst, die das gesamte Klimasystem in eine **völlig veränderte Dynamik** überführt.¹⁵⁴

Interessanterweise zeichnen neuere Untersuchungen in Teilbereichen des Klimasystems ein differenziertes Bild. Demnach könnte die Wirkung bestimmter Dominoeffekte geringer sein als bislang angenommen – allerdings begrenzt auf **einzelne Teilsysteme** (*Permafrost* und *Amazonas*) und ausdrücklich nur für den „natürlichen“ Treibhauseffekt der Kippdynamik:

- ▶ „Die Berechnungen der Forscher zeigen, dass der zusätzliche Temperaturanstieg durch die Kohlenstofffreisetzung aus *Permafrost* und *Amazonas* eher gering ausfällt – verglichen mit der Erwärmung, die der Mensch durch seine Emissionen verursacht.“¹⁵⁵

¹⁴⁹ Vgl. zu dieser zentralen Problematik des globalen Klimasystems grundlegend: PIK (2021, Klima-Domino-Effekte); Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades).

¹⁵⁰ Rapp (2021, Progression), S. 9, (Hervorhebungen im Original); dort auch eine überblickartige Darstellung weiterer Folgewirkungen und systemischer Interdependenzen.

¹⁵¹ Vgl. zu diesen Punkten ausführlich: unten, Kap. 4-5.

¹⁵² PIK (2021, Klima-Domino-Effekte), (Hervorhebungen durch Verfasser); unter Verweis auf die Originalstudie: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects).

¹⁵³ Vgl. zu diesen Punkten ausführlich: unten, Kap. 5.5 sowie 5.7.

¹⁵⁴ Dieser Effekt wurde bereits ausführlich beschrieben; vgl. dazu: oben, Kap. 4.1-4.3.

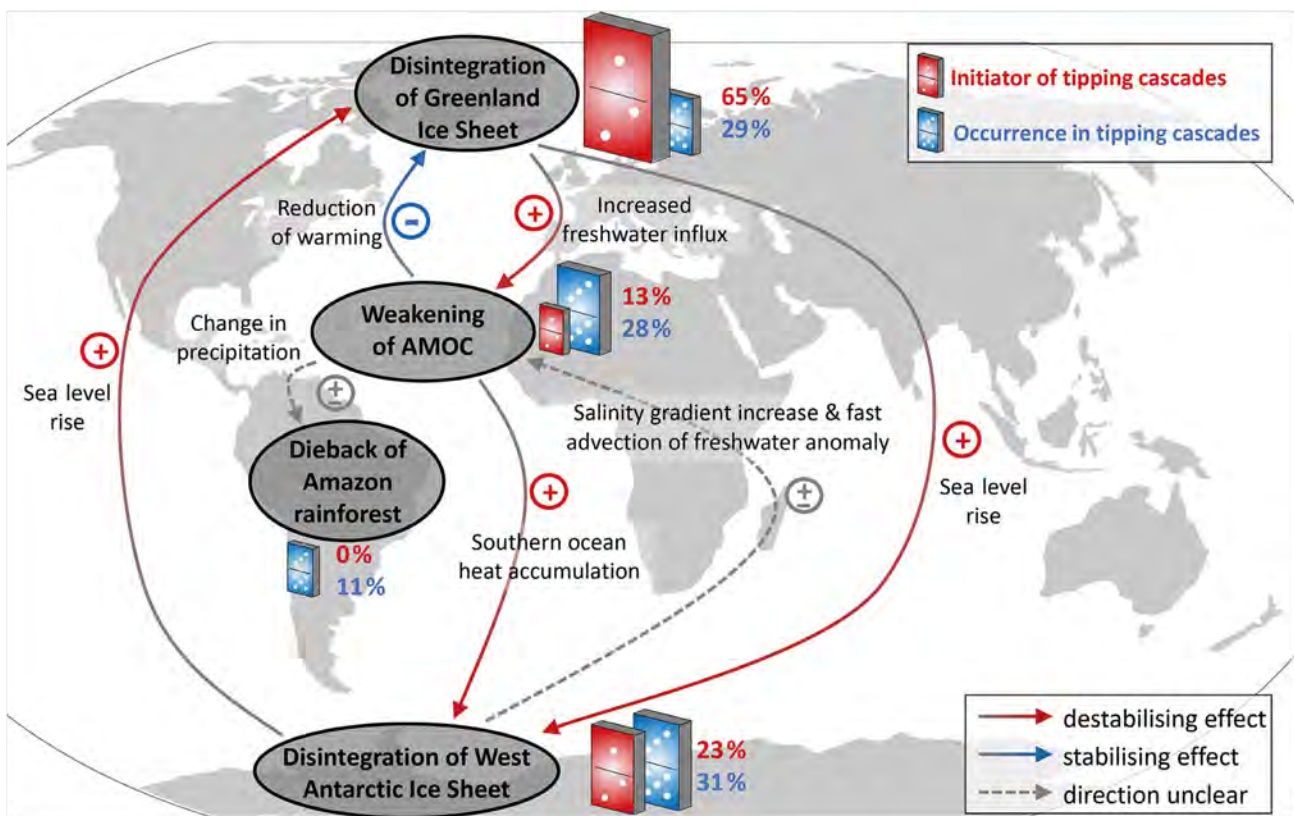
¹⁵⁵ IDW (2025, Klima-Dominoeffekt); unter Bezugnahme auf eine entsprechende Studie des Exzellenzclusters *CLICCS* der *Universität Hamburg*. Vgl. dazu ausführlich: Deutloff/Held/Lenton (2025, Tipping Points): „... we focus on abrupt thaw and collapse of permafrost and Amazon dieback, hereafter referred to as the ‚carbon tipping elements‘“.

Noch weitergehend sind jedoch neuere Analysen, die (richtigerweise) erstmals eine holistische und **interdependente Verknüpfung** unterschiedlicher Teilsysteme – und Kippdynamiken – des Erdsystems anstreben. Aus einer solchen **ganzheitlichen Perspektive** resultieren wertvolle Einsichten insbesondere zu positiven und negativen Rückkopplungseffekten sowie anderen Interaktionen und „*Dominoeffekten*“, die im Einzelfall auf eine mögliche **Stabilisierung** oder aber eine **Beschleunigung** existierender Kippdynamiken hindeuten (vgl. dazu die schematische Darstellung in Abb. 16).¹⁵⁶

Vor diesem Hintergrund ist eine explizit **systemische Betrachtungsweise** zwingend erforderlich, um die wichtigsten Ablaufsequenzen und Mechanismen des globalen Klimawandels zu verstehen und deren mögliche Dimensionen, Interdependenzen und gegenseitigen Abhängigkeiten adäquat abzuschätzen.¹⁵⁷

- Eine **weitere Komplexitätsebene** liegt dabei in aktuellen und künftigen Interaktionen der Klimaveränderungen **mit anderen planetaren Systemen**, die durch Stichworte wie Wirtschaft, Gesellschaft, Politik, Umwelt oder Gesundheit definiert sind.¹⁵⁸

Abb. 16: Komplexe Interdependenzen der Kippelemente im globalen Klimasystem



Quelle: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects)

¹⁵⁶ Wegweisend dafür sind insbesondere die Arbeiten des Klimaforschers Nico Wunderling und verschiedener Fachkollegen, vgl. dazu grundlegend: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects); sowie ausführlich: Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades).

¹⁵⁷ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 4.1.

¹⁵⁸ Diese ganzheitliche und systemdynamische Betrachtungsweise ist zentrales Element der vom *FERI Cognitive Finance Institute* auch in dieser Analyse angewandten *kognitiven Methodik*. Vgl. dazu weiterführend auch: unten, Kap. 7; sowie den ebenfalls sehr weit gefassten Analyse- und Beratungsansatz der *Global Tipping Points-Arbeitsgruppe*; vgl. dazu University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report); (sowie aktueller Report des Jahres 2025).

Vor diesen Zusammenhängen warnt dezidiert auch der Weltklimarat in IPCC (2024):

- „Climatic and non-climatic risks will **increasingly interact**, creating **compound and cascading risks** that are **more complex** and difficult to manage.“¹⁵⁹

Diese übergeordneten Wechselwirkungen und Dominoeffekte können an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden; sie waren jedoch bereits Gegenstand einer früheren Studie des FERI Cognitive Finance Institute unter dem Titel „The Great Progression“.¹⁶⁰ Hier geht's direkt zu einer Kurzversion der Studie:



4.5 Feedback Loops: Die Macht positiver Rückkopplungen

Das Grundprinzip dynamischer Dominoeffekte und Risikokaskaden liegt in dem unmittelbaren Einwirken einzelner Stufen eines nichtlinearen Prozesses auf eine ganze Abfolge nachgelagerter Prozessstufen und Wirkungsketten. Diese Prozessdynamik resultiert letztlich aus der „Macht positiver Rückkopplungen“ und „Feedback Loops“:

- **Positive Rückkopplungen** sind Phänomene, bei denen ein Element eines Systems oder eines Regelkreises immer wieder auf den Ausgangswert zurückwirkt, wodurch sich das gesamte System aufschaukelt und dessen Dynamik laufend verstärkt oder beschleunigt wird.¹⁶¹

¹⁵⁹ IPCC (2023, Statements), (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹⁶⁰ Vgl. dazu ausführlich: Rapp (2021, Progression). Vgl. zu diesen übergeordneten Aspekten ansatzweise aber auch die Ausführungen unten, Kap. 6; sowie die generelle Diskussion bei: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 35-46.

¹⁶¹ Vgl. dazu: Perplexity (2025, Rückkopplungen).

¹⁶² Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 4.3-4.5.

¹⁶³ Vgl. dazu die sehr gute Beschreibung unter: PIK (2025, Erdsystem): „Wo das helle Eis schwindet, kommt meist ein dunklerer Untergrund zum Vorschein, sei es das felsige Bett eines Gletschers oder das Meer. Diese freigelegte dunkle Oberfläche nimmt mehr Sonnenwärme auf, die wiederum den Schwund des verbliebenen Eises beschleunigt. Dieser Mechanismus, die so genannte Eis-Albedo-Rückkopplung, ist ein klassisches Beispiel eines selbstverstärkenden Prozesses, bei dem ein und dasselbe Phänomen, nämlich der Eisverlust, sowohl Folge als auch ein Teil der Ursache der lokalen Temperaturerhöhung ist.“ Vgl. dazu auch die grundsätzliche Darstellung in Abb. 81 in Kap. 7.

¹⁶⁴ Vgl. dazu jeweils ausführlich: unten, Kap. 5.6.

¹⁶⁵ Vgl. zu dieser Problematik überblickartig: WCRP (2008, Climate Models); Klimafakten (2022, Computermodelle); sowie die umfassende Metastudie von Lupo/Kininmonth (2013, Models).

Innerhalb des globalen Klimasystems existiert eine **Vielzahl solcher Feedback-Schleifen**, was letztlich der wichtigste Treiber für die bereits ausführlich erläuterten Dominoeffekte und Risikokaskaden ist.¹⁶²



Dem Schwellenverhalten im Erdsystem liegen oft selbstverstärkende Prozesse zugrunde, die – einmal angestoßen – auch ohne weiteren externen Einfluss weiterlaufen.

PIK (2025, Erdsystem)



Zu den typischen Beispielen positiver Rückkopplungseffekte beim Klima zählt etwa das **Abschmelzen polarer Eisflächen**: Dadurch kann im Verlauf weniger Sonnenlicht von der Erdoberfläche reflektiert werden, was den Abschmelzeffekt weiter vorantreibt.¹⁶³ Ein ähnlicher Rückkopplungseffekt zeigt sich beim **Auftauen von Permafrostböden**: Dieser Prozess setzt große Mengen im Boden gebundener Methangase frei, die dann wiederum den Prozess der Erderwärmung weiter vorantreiben.¹⁶⁴

Die Bedeutung derartiger Rückkopplungseffekte für das Ausmaß und die Dynamik der weltweiten Klimaveränderungen ist unbestritten. Dennoch sind sowohl die Kausalität als auch die genaue Wirkungsweise in vielen Fällen noch nicht abschließend erforscht. Selbst hochkomplexe Modellierungen sind – trotz oftmals sehr leistungsfähiger Simulationen – vielfach nicht in der Lage, das **Ineinandergreifen unterschiedlichster Einflussfaktoren** sowie die Abläufe bestimmter Wirkungsketten und die Bedeutung einzelner Prozessparameter vollständig und konsistent abzubilden oder gar die daraus resultierenden Gesamteffekte zuverlässig zu prognostizieren.¹⁶⁵

- Dieses Problem zeigt sich exemplarisch an erheblichen Unsicherheiten im Hinblick auf die **nordatlantische Um-
laufströmung (AMOC)**; ähnliches gilt für die **beschleunigte Schmelze des arktischen Meereises**, wo Dynamik und Ausmaß vorherige Modellprognosen immer wieder deutlich übertreffen (vgl. Abb. 17).¹⁶⁶

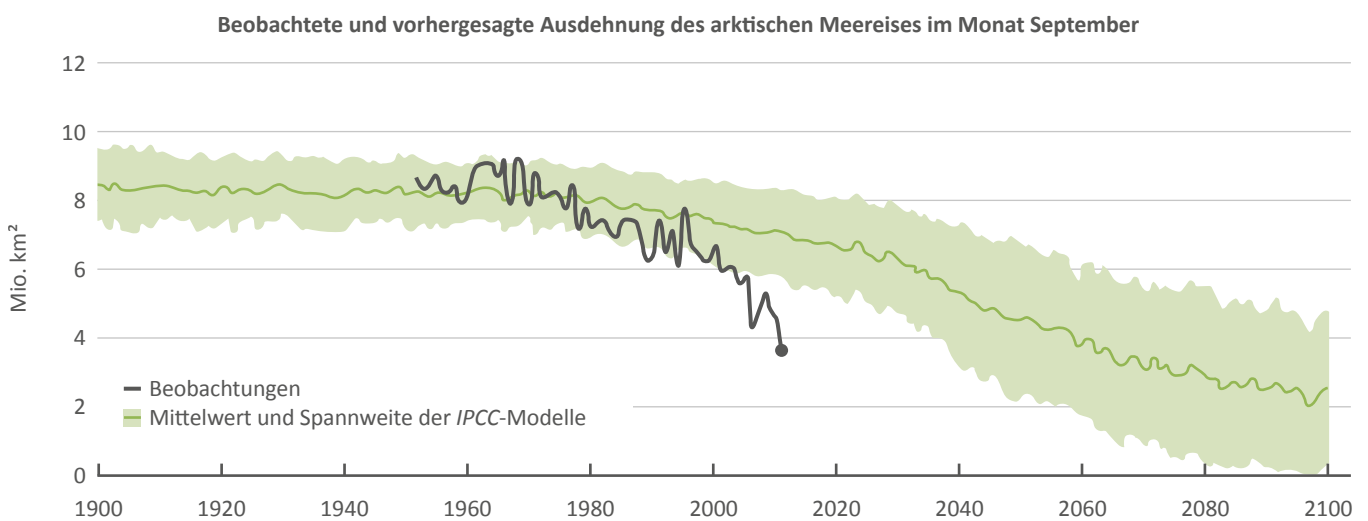
Ein sowohl möglicher als auch plausibler Grund hinter derartigen Fehleinschätzungen könnte in der Existenz **„versteckter“ Rückkopplungseffekte** liegen, deren Wirkungsweise und Zusammenspiel mit anderen Elementen des Klimasystems noch nicht vollständig erkannt oder erforscht wurde.¹⁶⁷

- Folglich warnt auch Wunderling (2021) vor dem Phänomen der **„rapid nonlinear changes of the climate“** und bezeichnet diese als **„one of the greatest risks in the climate debate.“**¹⁶⁸

Grundsätzlich zählt das Prinzip positiver Rückkopplungen zu den **wirkmächtigsten Einflussfaktoren** der globalen Erwärmung – und es steht zwangsläufig in sehr enger Beziehung zum Phänomen der *Climate Tipping Points*. Denn: Oftmals beginnt die positive Rückkopplung genau dann, wenn zuvor ein „kritischer“ Kippunkt überschritten wurde – und umgekehrt werden solche Kippunkte oftmals erst durch vorhergehende positive Rückkopplungen auf anderen Ebenen erreicht oder ausgelöst.¹⁶⁹

Diese typisch nichtlineare Konstellation in vielen Bereichen des globalen Klimasystems bedingt (per Definition) **hochdynamische und oftmals sehr abrupte Interaktionen und Ereignissequenzen**, was eine frühzeitige Wahrnehmung (oder gar Prognose) der gesamten Tragweite kommender Klimaphänomene deutlich erschwert.

Abb. 17: Unterschätzung komplexer Interdependenzen und kritischer Kippdynamiken



Quelle: Germanwatch (o.A., Arktis); basierend auf EEA/NSIDC

¹⁶⁶ Vgl. dazu Überblickartig: Klimafakten (2022, Computermodelle); Germanwatch (o.A., Arktis); zum erstgenannten Aspekt ausführlich: Leibniz-Gemeinschaft (2021, AMOC); PIK (2024, Umwälzströmung).

¹⁶⁷ Vor diesem Hintergrund sind ganzheitliche systemische Analysen von grundlegender Wichtigkeit; vgl. dazu etwa: Wunderling (2021, Dynamiken); sowie: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades). Gute Ansätze dazu verfolgt auch das TIPMIP-Projekt: TIPMIP (2025, TIPMIP).

¹⁶⁸ Wunderling (2021, Dynamiken), S. 214, (Hervorhebungen durch Verfasser).

¹⁶⁹ Beide Effekte sind in der Realität grundsätzlich von Bedeutung: Ein Überschreiten bestimmter Schwellenwerte der Erderwärmung löst voraussichtlich eine Vielzahl sehr dynamischer Rückkopplungseffekte aus; gleichzeitig wird das Erreichen dieser Schwellenwerte durch bereits laufende positive Rückkopplungen vorangetrieben und beschleunigt.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass innerhalb des hochkomplexen globalen Klimasystems nicht zwangsläufig nur „positive“ – also sich selbst verstärkende – Rückkopplungen auftreten, sondern potentiell auch „negative“ – also **stabilisierende oder prozessverlangsamende** – Feedbackschleifen möglich sind. Als Beispiele dafür gelten (jeweils als Folge höherer Temperaturen und CO₂-Konzentrationen) verstärkte Wolkenbildung, vermehrte CO₂-Aufnahme durch Biomasse sowie nicht zuletzt auch ozeanische Ausgleichsprozesse:

- ▶ So könnte nach Ansicht einzelner Klimaforscher die drohende Abkühlung des Golfstroms im Nordatlantik – gepaart mit anderen Effekten – möglicherweise das Ausmaß der Eisschmelze in Grönland sowie im Nordpolarmeer verlangsamen; umgekehrt könnte das Ausmaß der Golfstrom-Abschwächung durch die Eisschmelze in der Antarktis gemindert werden.¹⁷⁰

Auch bei diesen Prozessen sind jedoch weder das Ausmaß der gegenseitigen Wechselwirkungen noch der zeitliche und prozessuale Ablauf verlässlich abschätzbar.¹⁷¹

4.6 Irreversibilität: Das Problem der Unumkehrbarkeit

Der wohl mit Abstand bedrohlichste Aspekt des globalen Klimawandels liegt in der **weitgehenden Irreversibilität** der eintretenden Veränderungen. Dahinter steht eine schlichte Realität:

Sind die Eiskappen an den Polen sowie die Gletscher in den Alpen oder im Himalaya erst einmal abgeschmolzen, bleibt dieser Zustand für eine längere Zukunft unumkehrbar – natürlich nicht, ohne zuvor noch zahlreiche Naturkatastrophen und langfristig sehr kritische Nebenwirkungen ausgelöst zu haben. Und sind die Ozeane erst einmal aufgeheizt und der Meeresspiegel deutlich angestiegen, so ist allenfalls

in geologischen Zeiträumen – also im Laufe von Jahrtausenden – wieder mit einer möglichen „Normalisierung“ zu rechnen. Dazu erklärt die Klimaforscherin *Schuster* (2025):

- ▶ „Unsere Modelle zeigen, dass es viele Jahrhunderte, wenn nicht Jahrtausende dauern würde, bis sich die großen polaren Gletscher von einer Überschreitung der 3°C-Marke erholen würden.“¹⁷²

Im Einklang mit den heute wirksamen „Treibhausfaktoren“, insbesondere dem auf Jahrzehnte hinaus klimawirksamen CO₂-Ausstoß, entsteht so für die Mehrzahl der relevanten Klimaveränderungen das **Bild weitgehender Irreversibilität**.

- ▶ Diese zwingende (und zugleich deprimierende) Einsicht ergibt sich derzeit aus allen einschlägigen Klimamodellen – sie ist aber auch rein sachlogisch leicht nachvollziehbar.

Dennoch scheint es häufig so, als ob diese zentrale Erkenntnis noch nicht wirklich im kollektiven Bewusstsein angekommen ist. Auch die Pariser Klimaziele von 2015 verschwinden zuletzt immer mehr aus der politischen Diskussion – oder werden aktiv zurückgedrängt.¹⁷³

Ein möglicher Grund für diese offensichtliche Wahrnehmungs- und Reaktionsanomalie liegt in der – zumindest anfangs noch – relativen **Trägheit und Gradualität** zentraler Klimaveränderungen, denn:

- ▶ Trotz deutlich zunehmender globaler Durchschnittstemperaturen sowie immer häufiger eintretender Wetter-Extremereignisse ist der „wahre“ Zustand kritischer Kippelemente des globalen Klimasystems für Nichtexperten nicht immer gut nachvollziehbar.

Zudem sind wichtige Einzelfaktoren, wie die Erwärmung und Übersauerung der Ozeane, das Absterben der Korallenriffe, das Abtauen der Polkappen und des Grönland-Eisschildes oder die rapide fortschreitende Gletscherschmelze, mit ihren Auswirkungen oftmals weit entfernt – oder werden erst mit deutlicher Verspätung registriert.¹⁷⁴

¹⁷⁰ Vgl. in diesem Sinne etwa: Wunderling (2021, Dynamiken), S. 131-132 sowie 146. Grundsätzlich dazu auch: Swingedouw et al. (2008, Melting). Entsprechend folgern Swingedouw et al. (2008, Feedbacks): „Consequently, it appears that AIS [Antarctic Ice-Sheet] melting strongly interacts with climate and ocean circulation globally. It is therefore necessary to account for this coupling in future climate and sea-level rise scenarios.“

¹⁷¹ Vgl. dazu weiterführend die kritische Diskussion bei: Swingedouw et al. (2008, Melting).

¹⁷² *Lilian Schuster*, Klimaforscherin an der *Universität Innsbruck*, zitiert nach: Euronews (2025, Gletscher). Vgl. zur entsprechenden Studie, mit der Frage nach einer möglichen „Regeneration“ alpiner Gletscher, ausführlich: Schuster et al. (2025, Irreversible).

¹⁷³ Exemplarisch ist die destruktive Rolle der USA als einem der größten Emittenten von Treibhausgasen, die unter der erneuten *Trump*-Präsidentschaft ihre Anstrengungen zum Klimaschutz massiv zurückfahren; vgl. dazu etwa: ntv (2025, USA); ntv (2025, Klimabericht); ZDF heute (2025, Ausstieg). Ausführlich dazu auch: Blyth/Driscoll (2025, Dekarbonisierung).

¹⁷⁴ Vgl. dazu jedoch die in vielen Teilbereichen deutlich zunehmenden Warnungen führender Klimawissenschaftler, darunter etwa: Richardson et al. (2023, Boundaries).

- ▶ Verantwortlich dafür ist nicht zuletzt die „eingebaute Trägheit“ des Klimasystems, die kritische Entwicklungen oftmals erst mit **deutlicher Zeitverzögerung** hervortreten lässt.¹⁷⁵



Das Klimasystem reagiert träge auf die menschengemachten Veränderungen. Damit besteht die Gefahr, dass bestimmte Entwicklungen schon heute irreversibel sind.

World Ocean Review (2010, Weltmeere)



Die Grundprinzipien nichtlinearer Dynamik und vernetzter Feedback-Schleifen wirken dabei unmittelbar **problemverschärfend**; denn: Die stärksten Systemveränderungen treten oftmals erst in einem **sehr späten Stadium der Progression** ein – dann aber meist sehr abrupt und mit großer Vehemenz.¹⁷⁶ Explizit warnen dazu Kornhuber et al. (2024):

- ▶ „Diese Kippdynamiken wären auch bei einer Stabilisierung oder Verringerung der globalen Temperatur nicht direkt umkehrbar.“¹⁷⁷

Zusammenfassend lässt sich nach heutigem Stand der Forschung feststellen, dass der globale Klimawandel eine **Vielzahl gravierender Veränderungen** mit sich bringt, die nicht – wie oftmals unterstellt – nur temporär oder vorübergehender Natur sein werden. Ganz im Gegenteil:

- ▶ Der „blaue Planet“ Erde durchläuft sowohl gesamthaft als auch in einer Vielzahl kritischer Teilsysteme **irreversible Transformationen**, die eine massive Beeinträchtigung heutiger Lebensräume und Lebensweisen nach sich ziehen.¹⁷⁸
- ▶ Es ist genau diese **Perspektive der Irreversibilität**, die eigentlich zu enormen Anstrengungen beim Klimaschutz animieren sollte, oftmals aber eher lethargische Passivität auslöst.¹⁷⁹

Hoffnung machen in diesem Punkt allerdings die Ergebnisse neuerer Untersuchungen im Bereich der sogenannten „*Erdsystemwissenschaften*“, die Wirkungsweise und Interdependenz der miteinander verbundenen und **interagierenden Kippelemente** im Erdsystem mit Hilfe komplexer Analyseverfahren erforschen.

Unter dem Stichwort „*Overshooting-Scenario*“ (*Overshooting* steht für die zeitweise Überschreitung eines Temperatur-Schwellenwerts) werden dort mögliche Aktions- und Reaktionspfade erforscht, die in der Nähe kritischer Klimakippunkte möglich erscheinen – speziell mit Blick auf die zunehmend wahrscheinliche Überschreitung des 1,5°-Ziels:

- ▶ Demnach könnte das **Risiko eines irreversiblen Umkippens** wichtiger Klimasubsysteme deutlich gemildert werden, sofern „... *die Erwärmung nach einer zeitweisen Überschreitung der 1,5 Grad rasch wieder umgekehrt wird.*“¹⁸⁰
- ▶ Entscheidend für einen solchen „gemäßigten“ Verlauf wäre jedoch die massive Verringerung kritischer Treibhausgasemissionen noch „... *im laufenden Jahrzehnt*“ – was in Ermangelung politischer Entschlossenheit derzeit nur bedingt realistisch erscheint.¹⁸¹

Im *Synthesebericht* des Weltklimarats IPCC (2024) heißt es dazu grundsätzlich:

„Wenn die Erwärmung ein bestimmtes Niveau wie zum Beispiel 1,5°C überschreitet, könnte sie schrittweise wieder gesenkt werden, indem **netto negative CO₂-Emissionen** erreicht und aufrechterhalten werden. Dies würde im Vergleich zu Pfaden ohne Überschreitung einen zusätzlichen Einsatz von Kohlendioxidentnahme erfordern, was zu größeren Bedenken hinsichtlich Machbarkeit und Nachhaltigkeit führt.“¹⁸²

¹⁷⁵ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 4.2.

¹⁷⁶ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 4.3-4.5.

¹⁷⁷ Kornhuber et al. (2024, Kippdynamiken).

¹⁷⁸ Es versteht sich von selbst, dass derart gravierende Transformationen auch massive soziale und sozioökonomische Verwerfungen auslösen werden.

¹⁷⁹ Vgl. dazu bereits die Ausführungen oben, Kap. 2.

¹⁸⁰ Goethe-Universität Frankfurt (2024, Kipp-Risiken); unter Bezugnahme auf die Originalstudie von: Möller et al. (2024, Tipping Risks).

¹⁸¹ Zitat: Goethe-Universität Frankfurt (2024, Kipp-Risiken); unter Bezugnahme auf die Originalstudie von: Möller et al. (2024, Tipping Risks).

¹⁸² IPCC (2024, Synthesebericht), deutsche Zusammenfassung der wichtigsten Inhalte von: IPCC (2023, Report).

Der Klimaforscher *Nico Wunderling*, Professor für *Computational Earth System Sciences* am *Center for Critical Computational Studies (C³S)* an der Frankfurter *Goethe-Universität* und Teil einer Expertengruppe, die sich eingehend mit dem *Overshooting-Scenario* befasst, erläutert nachfolgend die wichtigsten Schlussfolgerungen und Kernaussagen zu diesem Szenario:

Temperatur-Overshoots und ihre Risiken für Kippelemente

Ein „*Overshoot*“ beschreibt eine Entwicklung des globalen Klimas, bei der die Erderwärmung zeitweise über ein festgelegtes Ziel – etwa die 1,5°C-Grenze des *Pariser Abkommens* – hinausgeht, bevor sie später durch Emissionsreduktionen und CO₂-Entnahme wieder auf und unter ein bestimmtes Erwärmungsniveau gesenkt wird. Angesichts gegenwärtiger politischer und wirtschaftlicher Trends scheint ein solcher *Overshoot* mittlerweile nahezu unausweichlich, um substantielle Kipp Risiken noch zu vermeiden.

Der aktuelle Stand (20-Jahres Mittel) der Erwärmung liegt bereits bei etwa 1,35°C, wobei das Jahr 2024 erstmalig die 1,5°C-Marke überschritten hat. Es ist also nahezu ausgeschlossen, dass 1,5°C noch ohne *Overshoot* erreicht werden können.¹⁸³

► **Das bedeutet auch, dass damit die Schwellwerte (Kippunkte) einiger Kippelemente womöglich schon überschritten wurden.**

Es sind fünf an der Zahl, die bereits bei einer Erderwärmung von 1,5°C in Gefahr geraten können: Der Subpolarwirbel (*subpolar gyre*) als wichtiger Teil der gesamten atlantischen Umwälzzirkulation, der Westantarktische Eisschild, der Grönländische Eisschild, Teile des Land-Permafrosts und die Korallenriffe, deren Kippunkt bei 1,2°C liegt und bei 1,5°C mit hoher Wahrscheinlichkeit überschritten ist.¹⁸⁴

Ob ein Kippelement tatsächlich ausgelöst wird, hängt aber nicht nur von der **Höhe** des *Overshoots*, sondern auch von seiner **Dauer** ab. Besonders schnelle Systeme, wie die tropischen Korallenriffe oder der Amazonas-Regenwald, reagieren bereits auf kurze und moderate Überschreitungen ihres Kippunktes empfindlich bzw. schnell. Langsame Systeme wie große Eisschilde benötigen dagegen länger, damit ein Kippprozess in Gang gesetzt wird. Das bedeutet, dass insbesondere eine kurzfristige Überschreitung eines Kippunktes unter Umständen noch rückgängig gemacht werden kann – sofern die Temperatur schnell und nachhaltig unter den Kippunkt zurückgeführt wird.

Doch auch dies birgt Herausforderungen: Je länger und höher der *Overshoot* ausfällt, desto größer ist das Risiko. Die wissenschaftliche Literatur zeigt, dass bereits bei einem 100-jährigen *Overshoot* über 1,5°C – mit einem Spitzenwert von 2,0°C – das **Kipp Risiko über 10%** liegen könnte. **Mit jedem weiteren Zehntelgrad über 2,0°C steigt dieses Risiko dann überproportional weiter und gefährdet weitere Kippelemente.**¹⁸⁵

► Die Kippelemente, die bei 2,0°C zusätzlich in Gefahr geraten, sind insbesondere die atlantische Umwälzzirkulation, der Amazonas-Regenwald, aber auch Teile der Ostantarktis.

Im Sinne einer Risikoabschätzung sind solche Risiken von über 10% viel zu hoch (es sind eigentlich extreme Risiken), zudem haben sie erhebliche Auswirkungen für das ganze Erdsystem zur Folge. Nicht umsonst gilt in der Finanzbranche häufig, ein Risiko (z.B. gegenüber finanziellen Impacts) nicht über 0,5% steigen zu lassen, um weiter liquide/solvent zu bleiben.¹⁸⁶ Dieses Level gilt häufig als Maßstab für Kapitalanforderungen im Versicherungswesen und anderen Finanzrisikobewertungen.

¹⁸³ Vgl. Future Earth/The Earth League/WCRP (2023, 10 NICS); Bevacqua et al. (2025, Earth); Reisinger et al. (2025, Overshoot).

¹⁸⁴ Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points).

¹⁸⁵ Wunderling et al. (2023, Overshoots); Möller/Högner et al. (2024, Tipping Risks).

¹⁸⁶ Trust et al. (2025, Planetary Solvency).

Zusätzlich wird die Stabilität vieler Kippelemente durch *anthropogene Belastungen* (z.B. Entwaldung im Amazonas zusätzlich zur globalen Erwärmung), *interagierende Kippprozesse* (Kippkaskaden) sowie *rückkoppelnde Prozesse* im Erdsystem geschwächt.

- ▶ Dies bedeutet, dass die **tatsächlichen Kippschwellen** in vielen Fällen sogar noch **unterhalb** der bisher angenommenen Werte liegen könnten.
- ▶ So könnte der Amazonasregenwald bereits **zwischen 1,5 bis 2°C** gefährdet sein – weit vor dem Korridor von 2 bis 6°C, der nur Auswirkungen der globalen Erwärmung berücksichtigt!

Daraus folgt: Das reine „Zurückkommen“ auf 1,5°C wird nicht ausreichen, um das Risiko des Kippens im Sinne planetarer Solvenz zu minimieren. Für besonders empfindliche und langsame Systeme, wie die Eisschilde aber auch die tropischen Korallenriffe, ist eine **Stabilisierung unter 1,0°C** notwendig.

„Unter der Annahme starker Wechselwirkungen zwischen den Kippelementen könnten Kippdynamiken für einzelne Elemente bereits bei deutlich niedrigeren Erwärmungsniveaus ausgelöst werden.“

Kornhuber et al. (2024, Kippdynamiken)

5 KIPPPUNKTE UND KIPPDYNAMIKEN IM GLOBALEN KLIMASYSTEM

5.1 Hintergrund und Abgrenzung

Führende Klimaforscher verweisen seit längerem auf das zentrale Problem der **kritischen Kippunkte** innerhalb des globalen Klimasystems. Wie bereits an anderer Stelle erörtert, zählen diese Kippunkte zu den **wichtigsten Risikofaktoren** im Hinblick auf die weitere Dynamik der globalen Klimaveränderungen:

- ▶ Die kritischen Kippunkte stehen für einen **abrupten, schnellen und irreversiblen Übergang** zentraler Subsysteme des Erdsystems in eine deutlich veränderte Systemkonstellation – mit dynamischen Rückwirkungen und Rückkopplungseffekten auf andere Subsysteme.¹⁸⁷
- ▶ Das „Umkippen“ solcher kritischer Kippunkte – oder auch dessen Verhinderung – ist deshalb von enormer Bedeutung für die weitere Entwicklung des Erdsystems.¹⁸⁸



Harmful tipping points in the natural world pose some of the gravest threats faced by humanity. Their triggering will severely damage our planet's life-support systems and threaten the stability of our societies.

University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 10



Die Abgrenzung der wichtigsten Klimakippunkte (sowie möglicher Problemhierarchien) ist auch in der einschlägigen Klimaforschung nicht immer einheitlich.¹⁸⁹

Eine auf Auswertung umfassender Fachliteratur basierende KI-Analyse führt jedoch zu folgendem grundsätzlichen Ergebnis:¹⁹⁰

Wichtige Kippunkte des globalen Klimasystems

- Abschmelzen des grönländischen und westantarktischen Eisschildes
- Abschmelzen des arktischen Meereises
- Abschwächung und Kollaps der Atlantischen Umwälzströmung (*AMOC*)
- Kollaps des Amazonas-Regenwaldes
- Auftauen des Permafrostbodens

Hinzu kommen mögliche Zusammenbrüche weiterer Ökosysteme (wie etwa boreale Wälder oder Korallenriffe), atmosphärische Störungen (etwa bei den Monsunsystemen), grundlegende Veränderungen troposphärischer Höhenströmungen (wie der *Jetstreams*) sowie Verschärfungen der *El Niño*-Klimaphänomene.¹⁹¹

Als **akut gefährdet** gelten gemäß neuerer Analysen die folgenden **fünf Kippdynamiken**:¹⁹²

- Kollaps des grönländischen Eisschildes
- Kollaps des westantarktischen Eisschildes
- Absterben des Amazonas-Regenwaldes
- Kollaps des Subpolaren Wirbels als zentralem Element der *AMOC*
- Absterben tropischer Korallenriffe

¹⁸⁷ Vgl. die zu diesem Kontext besonders relevanten Forschungsarbeiten unter: Lenton et al. (2019, Climate Tipping Points); Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points).

¹⁸⁸ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 3.2.2; sowie grundsätzlich: IPCC (2023, Report); University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report).

¹⁸⁹ In der heutigen Klimawissenschaft werden meist fünf zentrale Elemente des globalen Klimasystems als „entscheidende“ Kippunkte angeführt – allerdings gibt es dabei auch Unschärfen und abweichende Interpretationen sowie im Zeitablauf (je nach aktuellem Stand der Forschung) leicht veränderte Einschätzungen.

¹⁹⁰ Auswertung gemäß: Perplexity (2025, Kippunkte); analoge Ergebnisse zeigt auch eine identische Recherche über das KI-System *ChatGPT*. Vgl. zur Abgrenzung der wichtigsten Kippunkte auch bereits: oben, Kap. 3.2.2.

¹⁹¹ Auswertung gemäß: Perplexity (2025, Kippunkte).

¹⁹² Vgl. dazu etwa: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); gleichlautender Verweis auch durch: Perplexity (2025, Kippunkte).

In der Klimawissenschaft werden derzeit insbesondere **fünf zentrale Bereiche** des globalen Klimasystems als „entscheidende“ Kippelemente mit potentiell „harten“ Kippunkten angeführt.¹⁹³ Allerdings gibt es dabei auch Unschärfen und abweichende Interpretationen sowie im Zeitablauf (je nach aktuellem Stand der Forschung) leicht veränderte Einschätzungen.¹⁹⁴

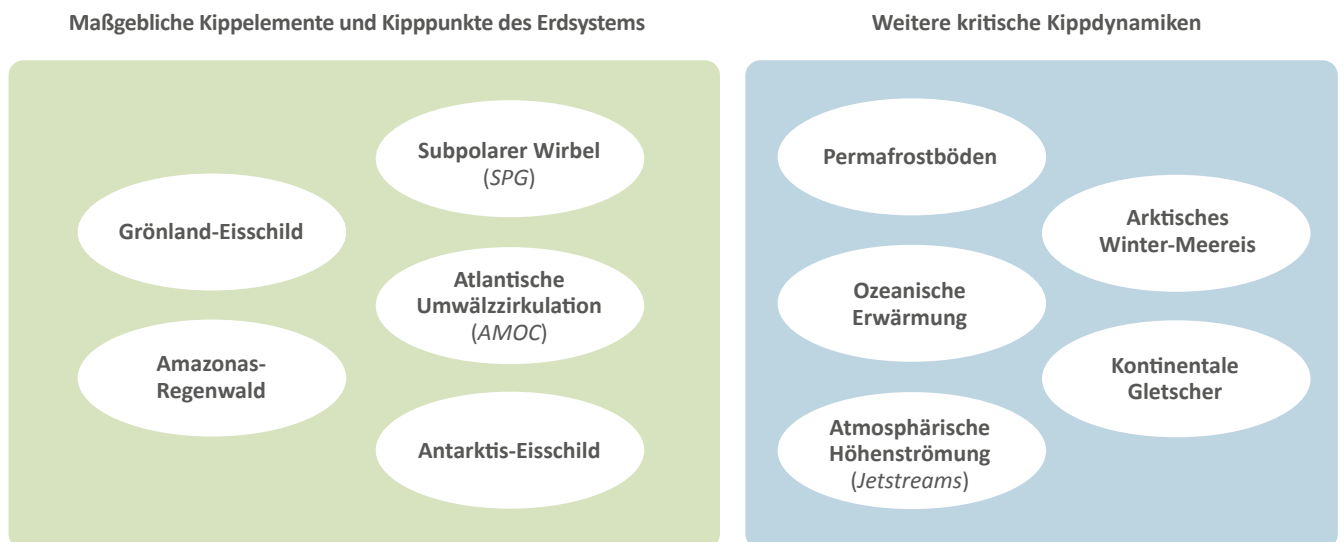
Vor diesem Hintergrund konzentriert sich die vorliegende Analyse auf die **fünf primären Kippunkte**, die auf die planetare *Kryosphäre*, *Hydrosphäre* und *Biosphäre* einwirken – und damit für die latente Fragilität des Erdsystems eine zentrale Rolle spielen.¹⁹⁵ Sie geht darüber hinaus aber auch noch auf **fünf weitere Bereiche** ein, die nach aktuellem Stand der Forschung als **kritische Elemente** ebenfalls von grundsätzlicher Bedeutung für die Stabilität – oder die Dynamik und Fragilität – des globalen Klimasystems sind (vgl. dazu Abb. 18).¹⁹⁶

Unabhängig von der numerischen Erfassung oder relativen Einordnung möglicher Klimakippunkte muss jedoch deren **elementare Eigenschaft** im Vordergrund stehen – als **Auslöser rapider und sehr dynamischer Veränderungen des Erdsystems!**

Mit Hilfe hochkomplexer Simulationen und immer leistungsfähigerer Klimamodelle versucht die Klimaforschung, insbesondere zwei zentrale Fragestellungen zu beantworten:

- Wo liegt der **kritische Temperaturanstieg**, bei dem einzelne Kippunkte mit irreversiblen Kippdynamiken ausgelöst werden?
- Wie würde das Auslösen einzelner Kippunkte die **Dynamik anderer Kippelemente beeinflussen** – und möglicherweise deren „Umkippen“ beschleunigen?

Abb. 18: Die fünf wichtigsten Klimakippunkte sowie nachgelagerte Kippdynamiken



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung

¹⁹³ Vgl. in diesem Sinne etwa: PIK (2025, Erdsystem); sowie die grundsätzlichen Erläuterungen: oben (Textbox).

¹⁹⁴ Eine aktuelle Bestandsaufnahme des *Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung* (PIK) bestätigt diese Unsicherheiten bei der Erfassung möglicher „Klima-Kippelemente“, die trotz intensiver Forschungsarbeiten noch nicht eindeutig und abschließend möglich ist; vgl. dazu: PIK (2025, Erdsystem): „Die Kippelementeforschung hat seit ihren Anfängen in den 2000er Jahren enorme Fortschritte gemacht. Einige Vorschläge, welche Komponenten des Erdsystems nach (durchaus auch nicht immer einheitlichen) Definitionen zu den Kippelementen gehören, sind wieder verworfen worden, oder zumindest so unsicher, dass sie in der obigen Liste nicht mehr auftauchen.“

¹⁹⁵ Vgl. dazu sowie zu den hier verwendeten Fachbegriffen ausführlich: oben, Kap. 2 (dort auch Abb. 1) und unten, Kap. 5.2; sowie grundlegend: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report).

¹⁹⁶ Vgl. dazu die Erläuterungen: oben, (Textbox).

Beim derzeitigen Pfad der Erderwärmung ist davon auszugehen, dass schon in wenigen Jahren die ersten kritischen Kippunkte, insbesondere das **Abschmelzen großer Eisschilde**, unwiderruflich „getriggert“ werden – oder sogar schon jetzt partiell ausgelöst wurden:

- ▶ **„Der Kippunkt des Eisschilts liegt bedrohlich nahe: Die neuesten Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Schwelle, ab der ein vollständiges, nicht mehr aufzuhaltendes Abschmelzen droht, näher ist als lange angenommen.“**¹⁹⁷

Noch weitreichender sind die Aussagen einer aktuellen Studie von *Deutloff et al. (2025)* aus dem Exzellenzcluster *CLICCS* der *Universität Hamburg*, die **16 mögliche Kippunkte** analysiert – mit einem sehr klaren Ergebnis:

- ▶ **„Die konservativste Schätzung der Forschenden ergibt, dass neun der 16 Kippunkte mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 50 Prozent überschritten werden.“**¹⁹⁸

Daran wird deutlich, dass die **grundsätzliche Dynamik** wichtiger Kippelemente und Kippunkte des Klimasystems nicht nur stetig voranschreitet, sondern als **globale Risikodimension** auch zunehmend spürbar wird. Systemische Interdependenzen und Rückkopplungseffekte spielen dabei eine zunehmend kritische Rolle, denn grundsätzlich gilt:

- ▶ **„Unter der Annahme starker Wechselwirkungen zwischen den Kippelementen könnten Kippdynamiken für einzelne Elemente bereits bei deutlich niedrigeren Erwärmungsniveaus ausgelöst werden.“**¹⁹⁹

Vor diesem Hintergrund rückt auch die **zeitliche Dimension** verstärkt in den Fokus:

- ▶ Auch hier zeigen neuere Untersuchungen immer öfter ein klares Bild **beschleunigter** und oftmals **unerwartet starker Ausschläge** wichtiger Kippelemente in Richtung ihrer kritischen Kippunkte.²⁰⁰
- ▶ Gleichzeitig besteht gemäß neuen Analysen ein immer **kürzeres Zeitfenster** (die Rede ist von lediglich 3 Jahren!) bis zur definitiven Überschreitung kritischer Niveaus bei den Treibhausgasemissionen und anderen klimarelevanten Einflussfaktoren.²⁰¹

Entsprechend lautet eine zentrale Feststellung des renommierten Klimaforschers *Forster (2025)*:

- ▶ **„Only 3 years left – new study warns the world is running out of time to avoid the worst impacts of climate change.“**²⁰²



The existence of tipping points means that ‚business as usual‘ is now over.

University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report)



¹⁹⁷ Perplexity (2025, Grönlandeis); (Hervorhebungen im Original); dazu weiter: „Aktuell ist wissenschaftlich unumstritten, dass das Grönlandeis inzwischen in einem sich selbst verstärkenden Tempo schwindet und sich die Auswirkungen – insbesondere auf den Meeresspiegel – in Zukunft noch drastisch verstärken können.“

¹⁹⁸ IDW (2025, Klima-Dominoeffekt); unter Verweis auf die Originalstudie von: Deutloff et al. (2025, Tipping Points): „... nine tipping points have a more than 50% probability of getting triggered.“

¹⁹⁹ Kornhuber et al. (2024, Kippdynamiken); (Hervorhebungen durch Verfasser). In diesem Sinne auch: Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades); sowie der Expertenbeitrag von *Nico Wunderling*: oben, Kap. 4.6; auch zitiert unter: Wunderling (2025, „Overshoot“).

²⁰⁰ Dies gilt insbesondere mit Blick auf das Grönlandeis; vgl. dazu etwa: scinexx.de (2021, Kippunkt); MDR (2025, Grönland-Eisschild). Vgl. auch generell die Übersicht bei: The Conversation (2025, 3 Years); unter Verweis auf eine neue Studie von: Forster et al. (2025, Indicators).

²⁰¹ Vgl. dazu stellvertretend die Übersicht bei: The Conversation (2025, 3 Years).

²⁰² *Piers Forster*, Direktor des *Priestley International Centre for Climate, University of Leeds*, in: The Conversation (2025, 3 Years); (Hervorhebungen im Original); unter Verweis auf eine neue Studie von: Forster et al. (2025, Indicators), unter Mitwirkung des *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)* und anderer Forschungseinrichtungen.

Insgesamt resultiert aus der Vielzahl aktueller Forschungsergebnisse zur derzeitigen Dynamik des globalen Klimawandels, einschließlich einer expliziten Betrachtung relevanter Kippunkte, ein Bild spürbar **erhöhter systemischer Kritikalität** (vgl. Abb. 19).²⁰³

Die immer deutlicher hervortretende Relevanz kritischer Kippunkte für die Stabilität (und Fragilität) des Erdsystems sowie des globalen Klimas verdeutlicht, dass die Menschheit mit Blick auf wichtige Umwelt- und Lebensbedingungen vor **einschneidenden Veränderungen** steht.

In diesem Sinne warnt eindringlich auch der *Global Tipping Points Report* (2023):

► „The existence of tipping points means that ‚business as usual‘ is now over.“²⁰⁴

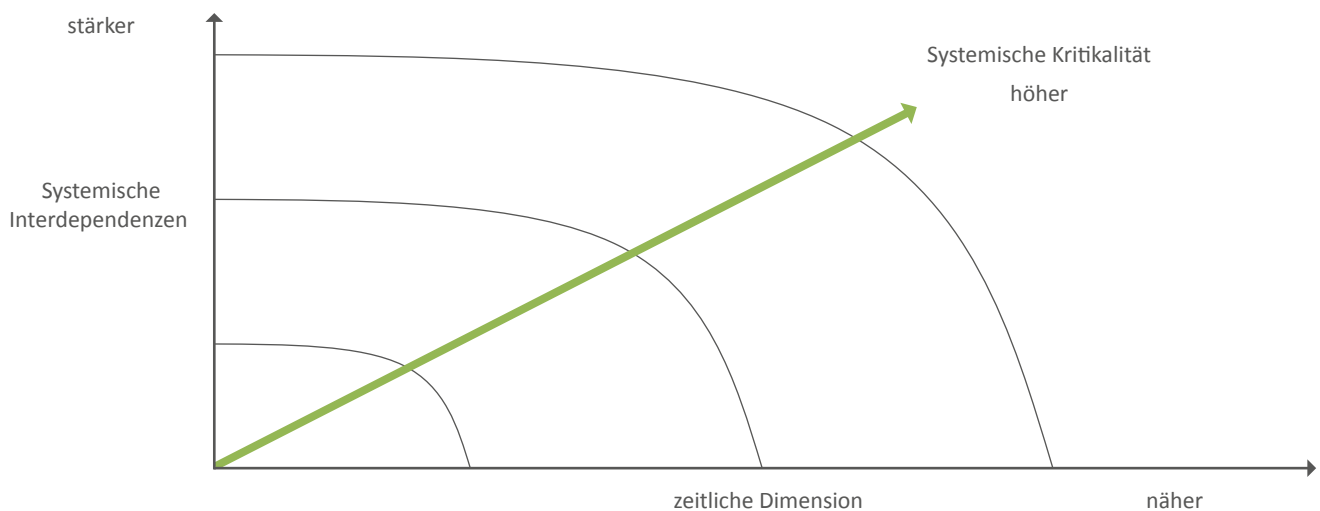
5.2 Abschmelzen polarer Eisschilde und Polkappen

Nach übereinstimmender Einschätzung der Klimaforschung zählen die aktuellen und absehbaren Veränderungen in der sogenannten **Kryosphäre** zu den wichtigsten und zugleich dringendsten Klimarisiken, die aus der anthropogenen Erderwärmung resultieren. Die *Kryosphäre* umfasst sämtliche Teile der planetaren Oberfläche, die von Eis bedeckt sind.²⁰⁵

Innerhalb dieses Gesamtspektrums, das grundsätzlich auch eisbedeckte *Gletscher* sowie gefrorene *Permafrostböden* umfasst, sind jedoch insbesondere **drei Elemente** von zentraler Bedeutung:

- der Eisschild und die Gletscher auf der Insel Grönland,
- das polare Schelfeis und der Eisschild der Antarktis,
- das arktische Winter-Meereis und die Eiskappe am Nordpol.

Abb. 19: Dynamik der Erderwärmung impliziert erhöhte systemische Kritikalität



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung

²⁰³ Da die Dynamik der globalen Erwärmung – nicht zuletzt aufgrund einer zeitverzögerten Wirksamkeit bestimmter Kausalketten („systemische Trägheit“) – vorerst weiter voranschreitet, können selbst Ansätze einer möglichen (relativen) Verlangsamung in Teilbereichen das Gesamtbild nicht wirklich verändern.

²⁰⁴ University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 10.

²⁰⁵ Vgl. dazu: GFZ (o.A., *Kryosphäre*); weiterführend auch: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report).

Alle drei Teilbereiche gelten als **kritische Kippelemente** des globalen Klimasystems und weisen eine **Vielzahl komplexer Selbstverstärkungs- und Rückkopplungsmechanismen** auf. Sie können dadurch direkt oder indirekt auch auf andere wichtige Subsysteme des Erdsystems einwirken und deren Dynamik entscheidend verändern oder verstärken.²⁰⁶

Auch wenn diese drei Teilbereiche als „kritische Kippelemente“ üblicherweise getrennt analysiert und erörtert werden, unterliegen sie dennoch **gemeinsamen Einflussfaktoren** und zeigen **ähnliche Ursache-/Wirkungsmechanismen**. Aus diesem Grund erfolgt hier zunächst eine gesamthafte Problemdarstellung, die auch übergreifende Schlussfolgerungen und über den Einzelfall hinausgehende Ableitungen ermöglicht. Unterschiede zwischen den drei Kippelementen werden dann im Rahmen einer detaillierten Betrachtung herausgearbeitet.

“

... *the ice sheets (...) are of particular importance for the stability of the climate system as a whole.*

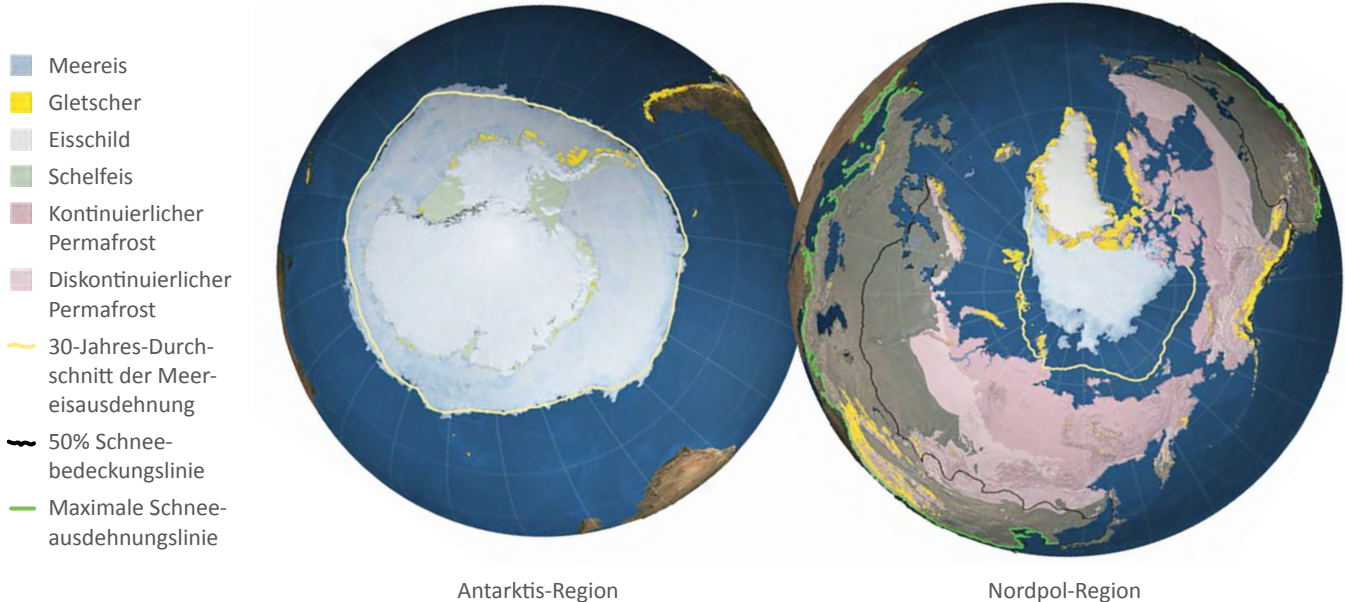
Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects)

”

Die wichtigsten Elemente der polaren Kryosphäre auf der Süd- und Nordhalbkugel verdeutlicht aus der Satellitenperspektive die Darstellung in Abb. 20.

Als grundsätzliche Gemeinsamkeit gilt die Tatsache, dass die **drei Kernelemente der Kryosphäre** bereits stark vom Trend der globalen Erwärmung in Mitleidenschaft gezogen wurden:

Abb. 20: Die Kryosphäre und ihre Komponenten in der Nord- und Südhemisphäre



Quelle: GFZ (o.A., Kryosphäre)

²⁰⁶ Vgl. dazu grundlegend: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); IPCC (2023, Report); PIK (2025, Erdsystem). Zu den peripheren Bereichen *Gletscher* und *Permafrost* vgl. die separaten Ausführungen: unten, Kap. 5.6 und 5.7.

Sowohl der Eisschild in Grönland als auch die beiden Polkapen zeigen seit einigen Jahren bereits **deutliche Abschmelzeffekte**, deren Dynamik und Intensität sich zuletzt stetig verstärkt hat.²⁰⁷

- ▶ Ursache dafür ist der anthropogene „Treibhauseffekt“ – mit einem signifikanten Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur in den letzten Jahrzehnten.²⁰⁸

Unter Würdigung der engen Zusammenhänge zwischen globaler sowie insbesondere **ozeanischer Erwärmung** konstatiert *Umweltbundesamt* (2024):

- ▶ „Eine beschleunigte Erwärmung der Ozeane ist in diesem Jahrhundert wahrscheinlich, mit einer **unvermeidlichen Zunahme der Schelfeisschmelze** – einschließlich in Regionen, die für die Stabilität des Westantarktischen Eisschildes entscheidend sind.“²⁰⁹

Polarregion und Arktische Eisschilde

Besonders ausgeprägt ist dieser Prozess auf der Nordhalbkugel – und dort insbesondere in der **arktischen Polarregion**, die seit Jahren eine deutlich **überproportionale Erwärmung** aufweist (vgl. dazu Abb. 21).

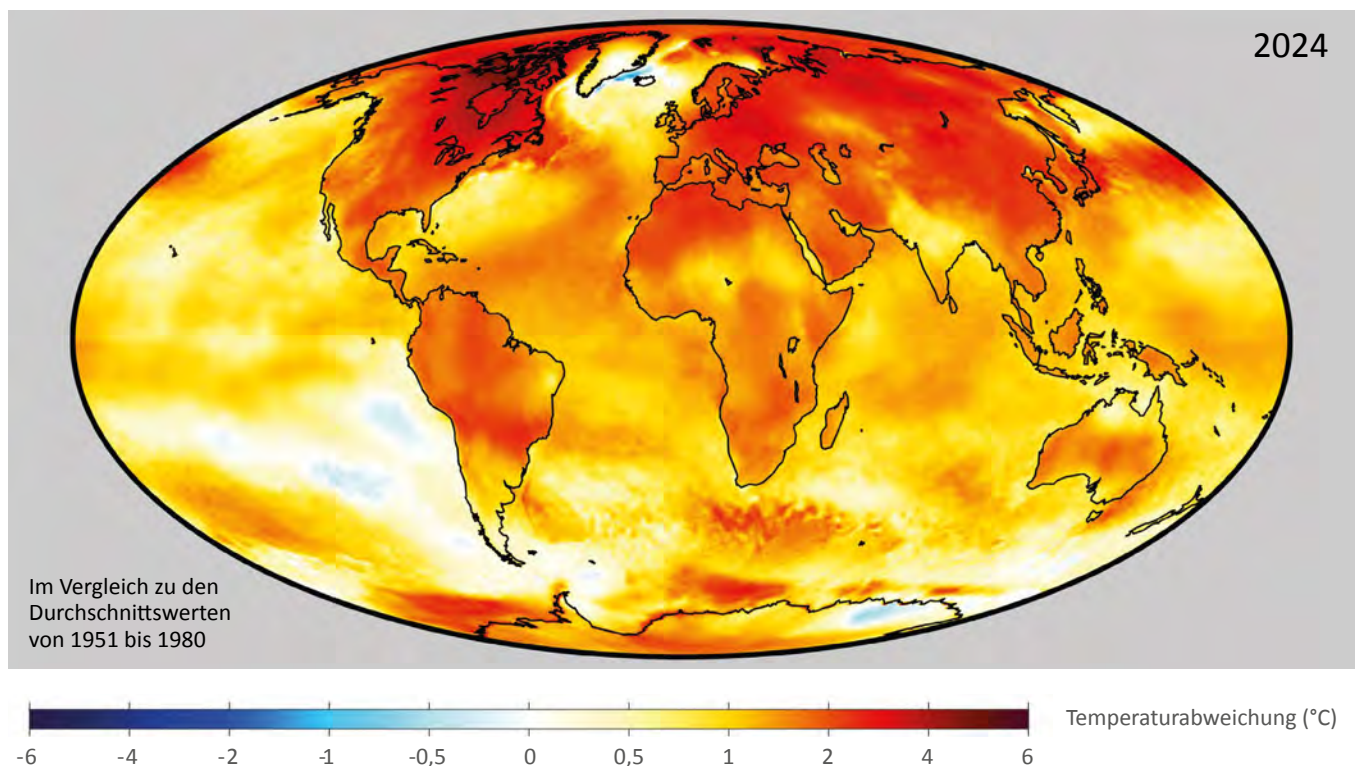
“

The Arctic is warming much faster than the rest of the planet ...

International Science Council (2021, Arctic)

”

Abb. 21: Phänomen der überproportionalen arktischen Erwärmung



Quelle: Berkeley Earth (2025, Report)

²⁰⁷ Vgl. dazu ausführlich: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); IPCC (2023, Report); PIK (2025, Erdsystem).

²⁰⁸ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 3.1; sowie dort Abb. 6. Zur diesbezüglichen „polaren Perspektive“, also den komplexen Wirkungsmechanismen des Klimawandels in den Polarregionen, vgl. grundlegend auch das Standardwerk von: AWI (2010, Perspektive).

²⁰⁹ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 24; (Hervorhebungen durch Verfasser).

Arktische Verstärkung und Albedo-Effekt

Ursache für diese auffallende Anomalie ist nach heutigem Stand der Forschung vor allem die sogenannte „**Arktische Verstärkung**“ (*arctic amplification*). Dieser Begriff umschreibt einen einfachen, zugleich aber sehr mächtigen **Rückkopplungseffekt**, der aus der dynamischen Interaktion zwischen dem Abschmelzen von Eis sowie dem freiwerdenden Untergrund resultiert:

- ▶ Während Eis eine sehr helle Farbe hat und deshalb Sonnenlicht gut reflektiert, ist der bei der Eisschmelze hervortretende Untergrund deutlich dunkler (Erdboden in Grönland, Meerwasser in der Arktis).²¹⁰
- ▶ Entsprechend reduziert sich mit fortschreitender Eisschmelze fortlaufend – und im Rahmen einer **nichtlinearen Dynamik** immer schneller! – auch die potentielle **Reflexions- und Rückstrahlwirkung** gegenüber einfallendem Sonnenlicht (auch bekannt als *Albedo*).²¹¹
- ▶ Dieser typisch nichtlineare Effekt ist auch als „**Eis-Albedo-Rückkopplungsmechanismus**“ bekannt und gilt als wichtiger Treiber hinter dem sich progressiv beschleunigenden Abschmelzen der arktischen Eismasse.²¹² (Vgl. dazu auch Abb. 22)



Nach Schätzungen ist diese Eis-/Schnee-Albedo-Rückkopplung für 30-60% der Arktischen Verstärkung verantwortlich.

Bildungsserver Hamburg (2025, Verstärkung)



Als **Albedo** bezeichnet die Klimaforschung das potentielle Rückstrahlvermögen gegenüber Sonnenlicht und einfallender Wärmestrahlung. Eis hat aufgrund seiner extremen Helligkeit einen gegenüber Erde oder Wasser deutlich höheren Wert der *Albedo*.

Als **Arktische Verstärkung** wird das Phänomen einer **positiven Rückkopplung** zwischen sinkender *Albedo* und zunehmender Erwärmung bezeichnet: Je stärker die Eisflächen in der Arktis schmelzen, desto geringer wird einfallendes Sonnenlicht reflektiert (mit der Folge einer höheren Wärmeabsorption), und desto höher ist der Grad der eintretenden Erwärmung. Dieser Prozess führt als Feedbackschleife zu einer **dynamischen Selbstverstärkung**.

Die Auswirkungen dieser dynamischen Rückkopplung sind eindeutig – und zeigen sich als stetig **fortschreitender Verlust an arktischem Eisvolumen**:

- ▶ „*This amplification is primarily caused by melting ice – a process that is increasing in the Arctic at a rate of 13% per decade.*“²¹³

Diese ständige (positive) Feedbackschleife beschleunigt den Prozess der arktischen Eisschmelze überproportional und ist nach Ansicht von Klimaforschern deren **dominanter Treiber**:

- ▶ „*Nach Schätzungen ist diese Eis-/Schnee-Albedo-Rückkopplung für 30-60% der Arktischen Verstärkung verantwortlich.*“²¹⁴

²¹⁰ Vgl. International Science Council (2021, Arctic): „*Ice is more reflective and less absorbent of sunlight than land or the surface of an ocean.*“

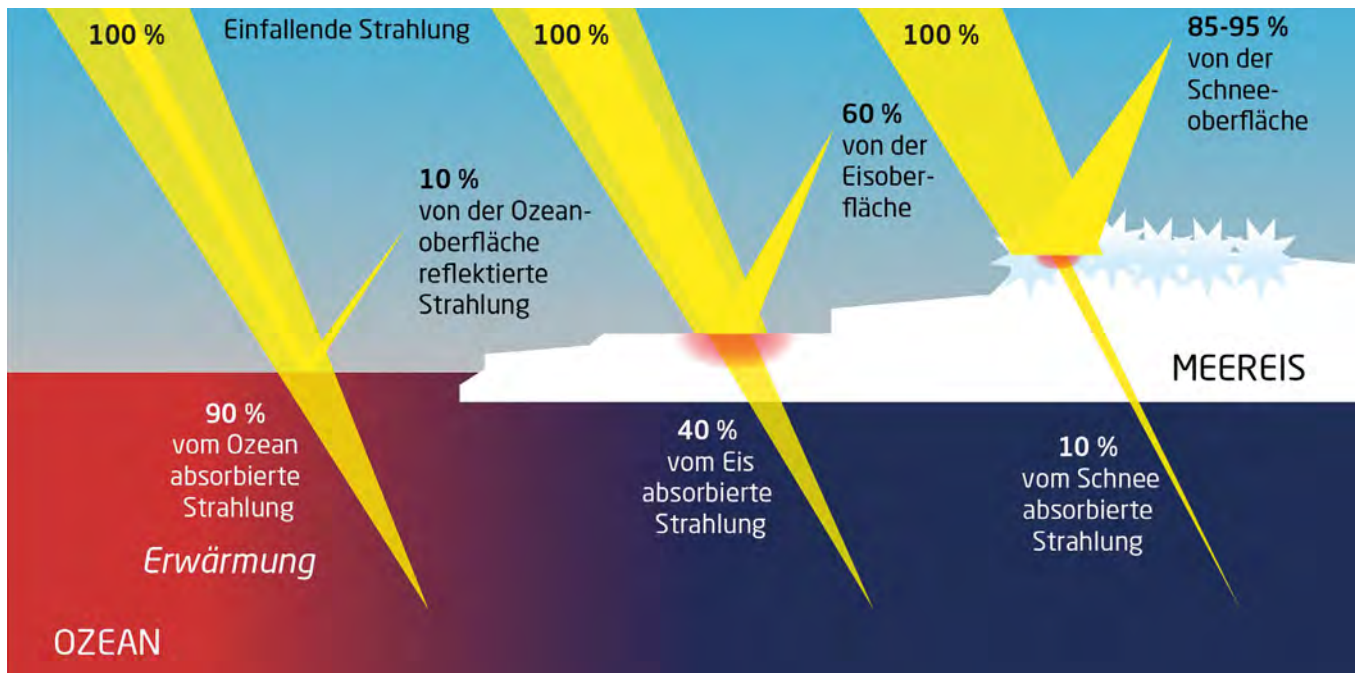
²¹¹ Vgl. International Science Council (2021, Arctic): „*When ice melts, it typically reveals darker areas of land or sea, and this results in increased sunlight absorption and associated warming.*“

²¹² Vgl. zum Begriff: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteo Schweiz (2025, Albedo); sowie zum Hintergrund ausführlich: Bildungsserver Hamburg (2025, Verstärkung). Oftmals ist auch die Rede vom „*Eis-/Schnee-Albedo-Effekt*“; vgl. dazu etwa: Meereisportal (2025, Eis-Schnee-Albedo-Effekt).

²¹³ International Science Council (2021, Arctic); analog dazu auch: NDR (2025, Meereis).

²¹⁴ Bildungsserver Hamburg (2025, Verstärkung).

Abb. 22: Grundprinzip des Eis-Schnee-Albedo-Effekts



Quelle: Meereisportal (2025, Eis-Schnee-Albedo-Effekt)

Die zugrundeliegende Progression ist – als **typische nichtlineare Dynamik!** – offensichtlich auch dafür verantwortlich, dass in den letzten Jahren sowohl das Tempo als auch das Ausmaß der arktischen Erwärmung von vielen Klimamodellen **systematisch unterschätzt** wurden, denn:

- ▶ Entgegen bisherigen Annahmen deuten neuere Messwerte und satellitengestützte Beobachtungen inzwischen auf eine bis zu **vierfach schnellere Erwärmung** der Arktis relativ zum globalen Durchschnitt!²¹⁵

Eine kurze Auswertung verschiedener Datenquellen mit Hilfe einer Künstlichen Intelligenz liefert dazu

folgendes Ergebnis: „Die bisherige Annahme, dass die Arktis sich nur doppelt so schnell wie der globale Mittelwert erwärmt, wurde durch neuere Forschungsergebnisse revidiert.“²¹⁶

“

The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979.

Rantanen et al. (2022, Arctic)

”

²¹⁵ Vgl. dazu ausführlich: Spiegel (2022, Arktis); Welt der Physik (2022, Erwärmung); sowie die Originalstudie unter: Rantanen et al. (2022, Arctic), mit der Kernaussage: „The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979.“ Vgl. dazu auch weiterführend: unten, Kap. 5.6.

²¹⁶ Perplexity (2025, Arktis).

Die überraschend hohe Dynamik der arktischen Eisschmelze wird offenbar von **mehreren ineinandergreifenden Faktoren** weiter vorangetrieben und beschleunigt.²¹⁷ Als Folge davon verliert das Nordpolareis seit Jahren kontinuierlich und progressiv an Volumen – gut erkennbar in einer Darstellung als „arktische Todesspirale“ (vgl. Abb. 23).²¹⁸

Auch für das Jahr 2025 zeichnet sich in der Arktis bereits wieder ein klarer Pfad zu einer **weiter rückläufigen Eisfläche** ab, deren Jahresminimum wohl erneut unter dem vorherigen Tiefstwert liegen dürfte (vgl. Abb. 24: aktuelle Rückzugsrate von 33,1% gegenüber langjährigem Mittelwert!).²¹⁹

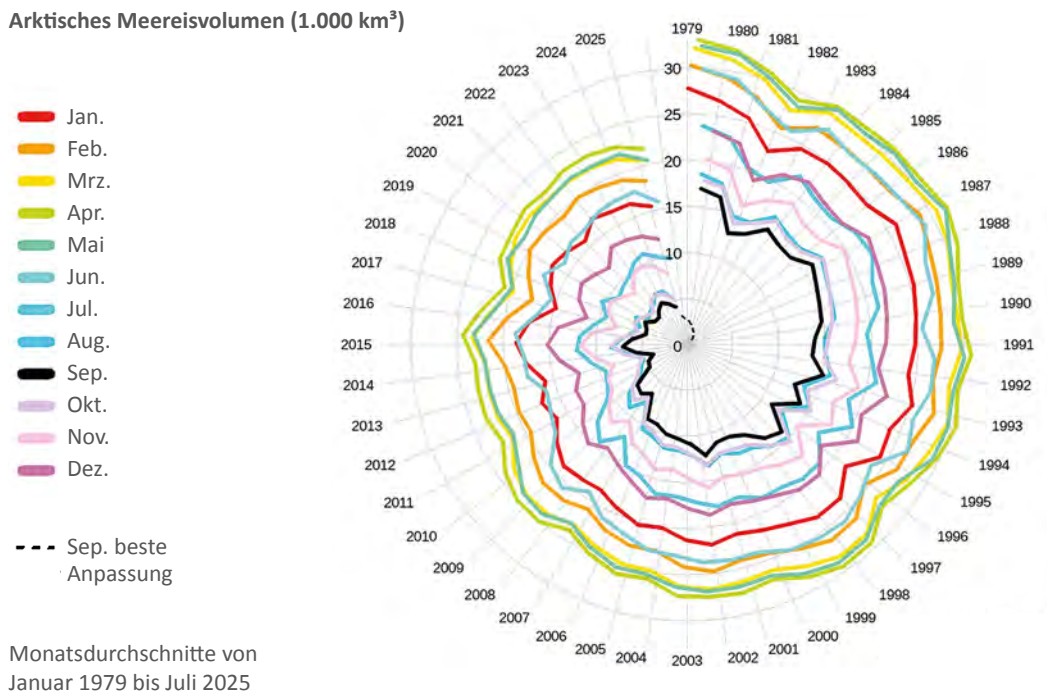
► „Infolgedessen ist das Sommerminimum des arktischen Meereises (...) mittlerweile **rund 40 Prozent kleiner** als noch zu Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979.“²²⁰

„Knapp **acht Millionen Quadratkilometer** bedeckte das arktische Meereis am Ende des Sommers in den Jahren von 1850 bis 1900 – also vor der Industrialisierung und somit vor dem Klimawandel. Inzwischen erreicht das Jahresminimum bei der Eisfläche **kaum noch vier Millionen Quadratkilometer** und rutschte im Jahr 2012 sogar **unter drei Millionen Quadratkilometer**. Wenn die von Polareis bedeckte Fläche weniger als eine Million Quadratkilometer groß ist, sprechen Forschende von einer ‚praktisch eisfreien Arktis‘.“²²¹

Seit dem Jahr 1980 hat sich die Eisfläche der Arktis bereits um **rund 20% reduziert**, doch eine weitere Fortsetzung – und **anhaltende Beschleunigung!** – zeichnen sich schon heute

Abb. 23: Progressiver Rückgang des Nordpolareises als „Arktische Todesspirale“

Arktisches Meereisvolumen (1.000 km³)



Quelle: Arctic Death Spiral (2025, Spiral)

²¹⁷ Zur Vielzahl dieser – oftmals unberücksichtigten oder unterschätzten – Einflussfaktoren vgl. sehr übersichtlich: Arctic Death Spiral (2025, Spiral).

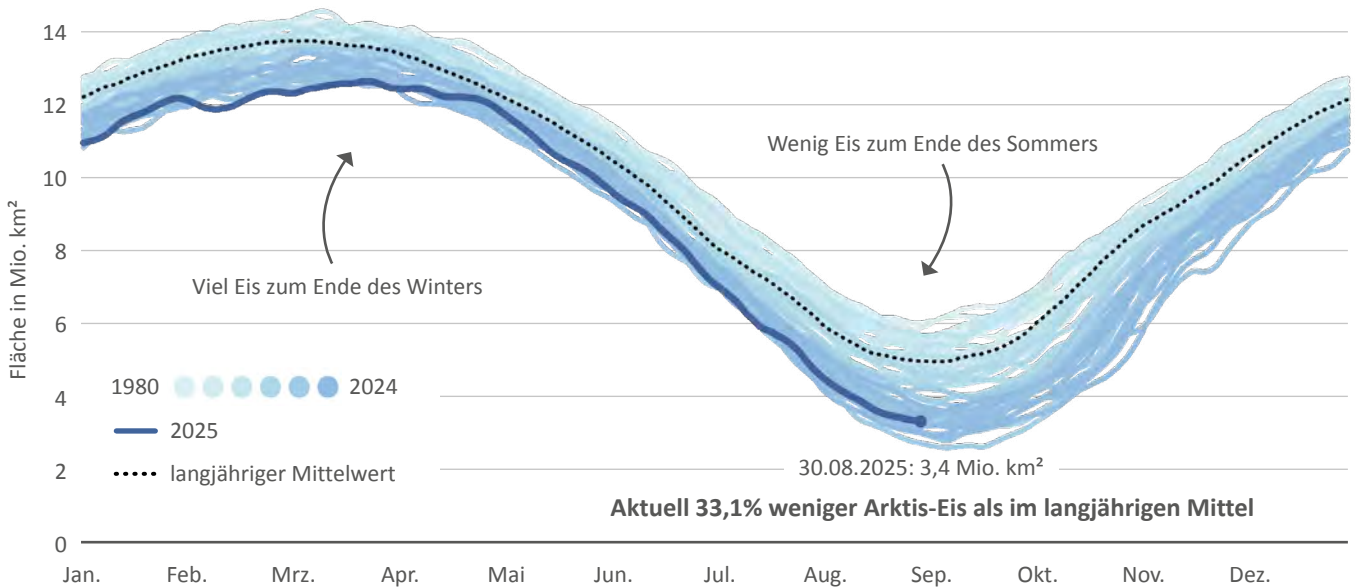
²¹⁸ Vgl. zum Konzept der „Arctic Death Spiral“: Climate State (2014, Spiral); die Darstellung in Abb. 23 geht zurück auf: Arctic Death Spiral (2025, Spiral).

²¹⁹ Vgl. dazu ausführlich etwa: Copernicus (2025, Meereis); NDR (2025, Meereis); NSIDC (2025, Charctic).

²²⁰ World Ocean Review (2024 Klimakrise), S. 17; (Hervorhebungen durch Verfasser). Für das Jahr 2012 (September) weist Bildungsserver Hamburg (2025, Meereis) sogar noch stärkere Eisverluste nach: „Damit wurde der Mittelwert der Jahre 1979-2000 von 6,7 Mio. km² nahezu halbiert.“

²²¹ NDR (2025, Meereis).

Abb. 24: Signifikant rückläufiges Eisvolumen in der Arktis



Quelle: NDR (2025, Meereis)

klar ab. Entsprechend könnten neuesten Projektionen zufolge bis spätestens Ende des Jahrhunderts große Teile des Nordpolarmeers **weitgehend eisfrei** sein – zumindest in den Sommermonaten (vgl. Abb. 25, S. 60).²²²



The Arctic cryosphere is an integral part of the Earth's climate system that has recently undergone unprecedented changes

Cohen et al. (2024, Anomalous)



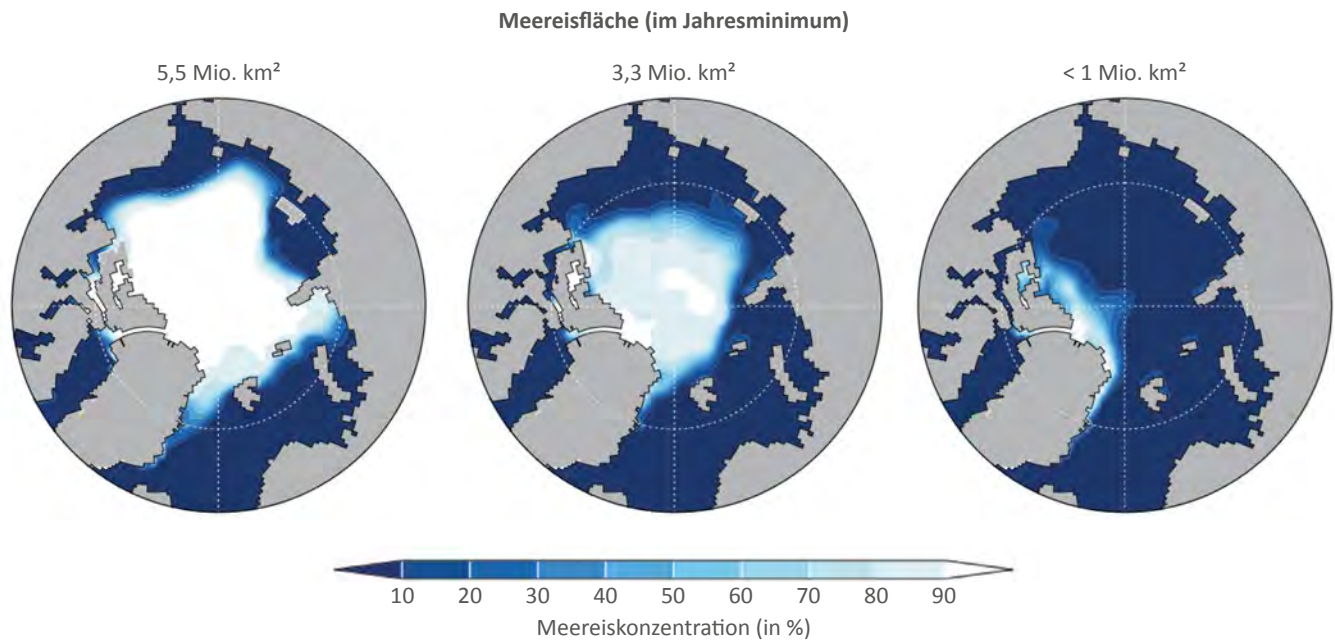
Dieser grundsätzliche Befund und die daran geknüpfte Prognose werden auch nicht durch neuere Studien entwertet, wonach sich „... der Rückgang des arktischen Meereises in den letzten zwei Jahrzehnten ‚erheblich verlangsamt‘ habe.“²²³ Dieses Ergebnis sei – im Gegenteil – in weitgehender Übereinstimmung mit **natürlichen Klimavariationen** („consistent with internal climate variability“) und mache ein nachfolgend **umso stärkeres Ausmaß der Eisverluste** wahrscheinlich („the same slowdown makes a faster-than-average sea ice decline more likely in the coming years“).²²⁴

²²² Vgl. dazu: Universität Hamburg (2025, Arktis): „Denn bei einer Erwärmung von 2,7 Grad Celsius wird das jetzt noch von Meereis bedeckte Nordpolarmeer im Sommer monatelang eisfrei sein – in der modernen Menschheitsgeschichte ein beispielloser Zustand.“; analog auch die Studie von: Jahn et al. (2024, Projections). Andere Untersuchungen sehen eine temporär eisfreie Arktis bereits in den kommenden rund zehn Jahren; vgl. dazu überblickartig und mit weiteren Verweisen: Standard (2023, Meereis). Ähnlich – jedoch etwas abgeschwächt – auch die diesbezügliche Zukunftsprognose von: World Ocean Review (2024 Klimakrise), S. 17.

²²³ Tagesspiegel (2025, Arktis); unter Bezugnahme auf eine neue Forschungsarbeit von: England et al. (2025, Arctic). Vgl. dazu analog auch: Guardian (2025, Slowdown).

²²⁴ Vgl. dazu ausführlich: England et al. (2025, Arctic).

Abb. 25: Projektion eines anhaltenden Rückgangs beim arktischen Meereis



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025; in Anlehnung an Standard (2025, Meereis); Datengrundlage: Jahn et al. (2024, Projections)

Klimaforscher gehen davon aus, dass der *Eis-Albedo-Rückkopplungsmechanismus* der Arktischen Verstärkung nicht nur die eigene progressive Dynamik immer schneller vorantreibt, sondern zusätzlich auch den **Gesamtprozess der globalen Erwärmung laufend beschleunigt und verstärkt**. Die Ursache ist klar:

- ▶ Eine schrumpfende planetare Eisdecke, die sich durch die *Eis-Albedo-Rückkopplung* laufend weiter dezimiert, hat zwangsläufig auch eine **immer geringere Abstrahlwirkung** für einfallende Sonnenwärme – und verstärkt so den Trend der globalen Erwärmung!

Dieser Effekt hat inzwischen eine hohe Signifikanz und trägt massiv – Schätzungen zufolge mit einem **Anteil von 30 bis 50%** – zur aktuellen Dynamik der Erderwärmung bei:

- ▶ „The Arctic is warming much faster than the rest of the planet and the loss of reflective ice contributes somewhere between 30-50% of Earth’s global heating.“²²⁵

Dieser **selbstverstärkende Rückkopplungsprozess** ist ein Musterbeispiel dafür, wie das Erdsystem und einzelne Klimasubsysteme durch eine Kombination komplexer Interdependenzen und Feedbackschleifen immer stärker – und immer schneller – in Mitleidenschaft gezogen werden.

- ▶ Genau hier liegt auch der Grund, warum Klimawissenschaftler mit Blick auf die zentralen Kippelemente der Kryosphäre zunehmend besorgt sind und vor einem **baldigen Umkippen** einzelner Systeme warnen – insbesondere in Grönland und beim Antarktischen Eisschild.²²⁶

²²⁵ International Science Council (2021, Arctic). Grundsätzlich analog, jedoch mit etwas geringeren Schätzwerten: Wunderling (2021, Dynamiken), S. 66: „... we find that global warming is increased by the decay of the Earth’s cryosphere. The disintegration of the Arctic summer sea ice and the retreat of mountain glaciers, the Greenland and the West Antarctic Ice Sheets together cause an additional GMT increase of 0.43°C (0.39-0.46°C) for a baseline scenario of 1.5°C warming above pre-industrial levels, which translates into an additional warming of 29% (26-31%).“

²²⁶ Vgl. dazu überblickartig: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects); Armstrong McKay (2022, Climate Tipping Points); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades); University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report). Vgl. dazu auch die eindrücklichen Darstellungen in Abb. 11 sowie Tab. 2 dieser Analyse.

Die entsprechenden Folgen eines solchen beschleunigten Umkippens wären nicht nur gravierend, sondern auch äußerst vielschichtig, wie *Global Tipping Points Report* (2023) explizit verdeutlicht:

- ▶ „The consequences of crossing cryospheric tipping points amplify the effects of climate change and have widespread impacts, affecting sea level, ecosystems, wildlife habitats, coastal infrastructure, human livelihoods and regional climate patterns.“²²⁷

Diese Warnungen erscheinen insofern berechtigt, als die polaren Eissysteme bereits bei einer **relativ geringen Erhöhung** der globalen Durchschnittstemperatur zu tauen beginnen, aufgrund **endogener Feedbackmechanismen** sehr schnell weiter abschmelzen und damit ihre **selbsterstörerische Eigendynamik** in Gang setzen:

- ▶ Gemäß aktueller Schätzungen der Klimawissenschaft liegt die Temperatursensitivität der polaren Eissysteme im Bereich einer relativen Erhöhung von 1,5-2°C – doch kritische Schmelzprozesse beginnen bereits bei einem Temperaturanstieg von **rund 0,8°C**.²²⁸

Da die globale Erwärmung inzwischen einen **Anstieg von rund 1,5°C** verzeichnet und eine weitere Zunahme vorerst kaum zu verhindern sein dürfte, liegen die aus wissenschaftlicher Sicht „**kritischen Kippunkte**“ wichtiger polarer Eissysteme bereits in unmittelbarer Nähe. Entsprechend besorgt äußert sich der *Global Tipping Points Report* (2023):

- ▶ „... we are getting dangerously close to the temperature thresholds of some major tipping points for the ice sheets of Greenland and West Antarctica.“²²⁹

Grönland-Eisschild

Speziell **Grönland** gehört derzeit zu den am stärksten von der Eisschmelze betroffenen Gebieten und zeigt dabei erwartungskonform – getrieben von den dargestellten endogenen Rückkopplungen – eine stetig **zunehmende Dynamik**.²³⁰ Infolgedessen übertrifft der jährliche Eisverlust in Grönland immer wieder alle vorherigen Prognosen.²³¹

Entscheidend dabei ist die starke regionale Erwärmung in der Arktis, die in Grönland ständig neue **Temperaturrekorde** erreicht. Klimawissenschaftler des AWI (2023) stellen hierzu fest:

- ▶ „Die Jahre 2001 bis 2011 waren in Höhenlagen des grönländischen Eisschildes 1,5°C wärmer als das 20. Jahrhundert und die wärmste Dekade in den letzten tausend Jahren.“²³²



Warming of +1.5°C is too high for polar ice sheets.

Stokes et al. (2024, Warming)



²²⁷ University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 57.

²²⁸ Vgl. dazu etwa: PIK (2022, Klima-Kippunkte); Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken). Analog und mit Blick auf das Grönlandeis auch: scinexx.de (2021, Kippunkt): „Nach bisherigen Erkenntnissen soll dieser Kippunkt im Bereich von 0,8 bis 3,2 Grad Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Niveau liegen.“

²²⁹ University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 56.

²³⁰ Vgl. dazu: scinexx.de (2018, Eisverlust); eine nicht unerhebliche Rolle spielen dabei auch atmosphärische Effekte des Klimawandels: „Durch veränderte Luftströmungen kommt es im Sommer zudem immer häufiger zu überproportional starker Erwärmung Grönlands und entsprechenden Rekordschmelzen.“ Vgl. dazu analog auch Science Media Center (2020, Grönlandeis).

²³¹ Vgl. dazu: scinexx.de (2020, Prognosen): „Doch schon länger deuten Messdaten darauf hin, dass Grönlands Gletscher immer schneller schmelzen.“; sowie explizit auch: scinexx.de (2020, Rekordschmelze).

²³² AWI (2023, Erwärmung).

Daraus resultiert eine **dynamische Wechselwirkung** zwischen stetig fortschreitender (und dabei latent zunehmender) polarer Erwärmung sowie (daraus unmittelbar resultierendem) rückläufigem *Albedo-Effekt*, wobei sich beide Effekte im Sinne einer positiven Rückkopplung **laufend verstärken** – was gesamt-haft bedeutet:

- ▶ „Schon jetzt verläuft der Eisverlust dort nicht mehr linear, sondern exponentiell.“²³³

Für dieses **exponentielle Verlaufsmuster** spielt ein weiterer **endogener Rückkopplungseffekt** (das sogenannte „*Melt-Elevation-Feedback*“) eine zentrale Rolle, der den Eisverlust in Grönland äußerst dynamisch vorantreibt – offenbar wesentlich stärker als bislang unterstellt:

- ▶ „Eine Schlüsselrolle für die Destabilisierung des Eisschildes spielt (...) das sogenannte *Melt-Elevation-Feedback* – eine **positive Rückkopplung**, die das Abtauen beschleunigt. Dabei kommt zum Tragen, dass es in hohen Lagen kälter ist als in tiefer gelegenen Bereichen. Wenn nun die Gletscher und Eisfelder durch das Abtauen zunehmend an Höhe verlieren, sinkt ihre Oberfläche in wärmere Luftschichten ab. Das wiederum verstärkt das Abtauen und führt damit zu einem weiteren Höhenverlust – ein **Teufelskreis** beginnt.“²³⁴

Die Ergebnisse dieser Dynamik sind eindeutig – und vor Ort seit Jahren auch für ungeübte Augen leicht erkennbar. Noch deutlicher zeigt sich die massive Eisschmelze in Grönland aber anhand **satellitengestützter Vermessungen**, wie sie etwa vom *GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung* laufend ausgewertet werden – mit sehr klarem Befund:

- ▶ „Seit 2002 hat der grönländische Eisschild pro Jahr rund 225 Gigatonnen Eismasse verloren. Eine Gigatonne Wasser entspricht einem Wasserwürfel mit einer Kantenlänge von einem Kilometer. Das Schmelzwasser der Eismassen trägt zu einem jährlichen Anstieg des Meeresspiegels um 0,6 mm bei oder fast 14 mm seit 2002.“²³⁵

Wie die zugehörigen Abb. 26 und 27 zeigen, ist dieser Schmelzprozess zwar nicht gleichmäßig über die grönländische Topographie verteilt, dennoch führt er im Ergebnis zu einem relativ **stetigen und zugleich sehr großvolumigen Verlust an Eismasse**.²³⁶

Der Abschmelzprozess in Grönland steht stellvertretend nicht nur für die Probleme der gesamten Kryosphäre, sondern auch für viele andere dynamische Prozesse des Erdsystems, die durch die globale Erwärmung ausgelöst und angetrieben werden.

- ▶ Er verdeutlicht dabei exemplarisch (und besonders eindringlich) das bereits mehrfach dargestellte **Prinzip nichtlinearer Dynamik** – als Folge multipler Selbstverstärkungs- und Rückkopplungsmechanismen im globalen Klimasystem.²³⁷

Infolgedessen verdichten sich auch die Anzeichen dafür, dass bei den polaren Eisschilden – speziell in Grönland – die jeweils **kritischen Kippunkte** bereits nahezu erreicht oder sogar schon überschritten sein könnten.²³⁸ Diese Sorge wird zunehmend auch von Klimawissenschaftlern geteilt:

- ▶ „Die **nichtlineare Zunahme** der Schmelzraten des grönländischen Eisschildes und des Schmelzwasserabflusses deuten darauf hin, dass die **kritische Temperaturschwelle näher liegen könnte als zuvor gedacht**.“²³⁹

²³³ scinexx.de (2021, Kippunkt). Analog und noch ausführlicher dazu auch: scinexx.de (2018, Eisverlust): „Bohrkernanalysen zeigen, dass der Eisverlust nicht linear verläuft, sondern exponentiell zugenommen hat.“ Zu den dafür verantwortlichen Mechanismen und Interdependenzen vgl. bereits: Box et al. (2012, Greenland).

²³⁴ scinexx.de (2021, Kippunkt); (Hervorhebungen durch Verfasser).

²³⁵ Global Water Storage (2025, Eismassenverlust). World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 17, veranschlagt den Masseverlust von 1992-2020 auf „schätzungsweise 4890 Milliarden Tonnen Eis“ (rund 5000 Gigatonnen).

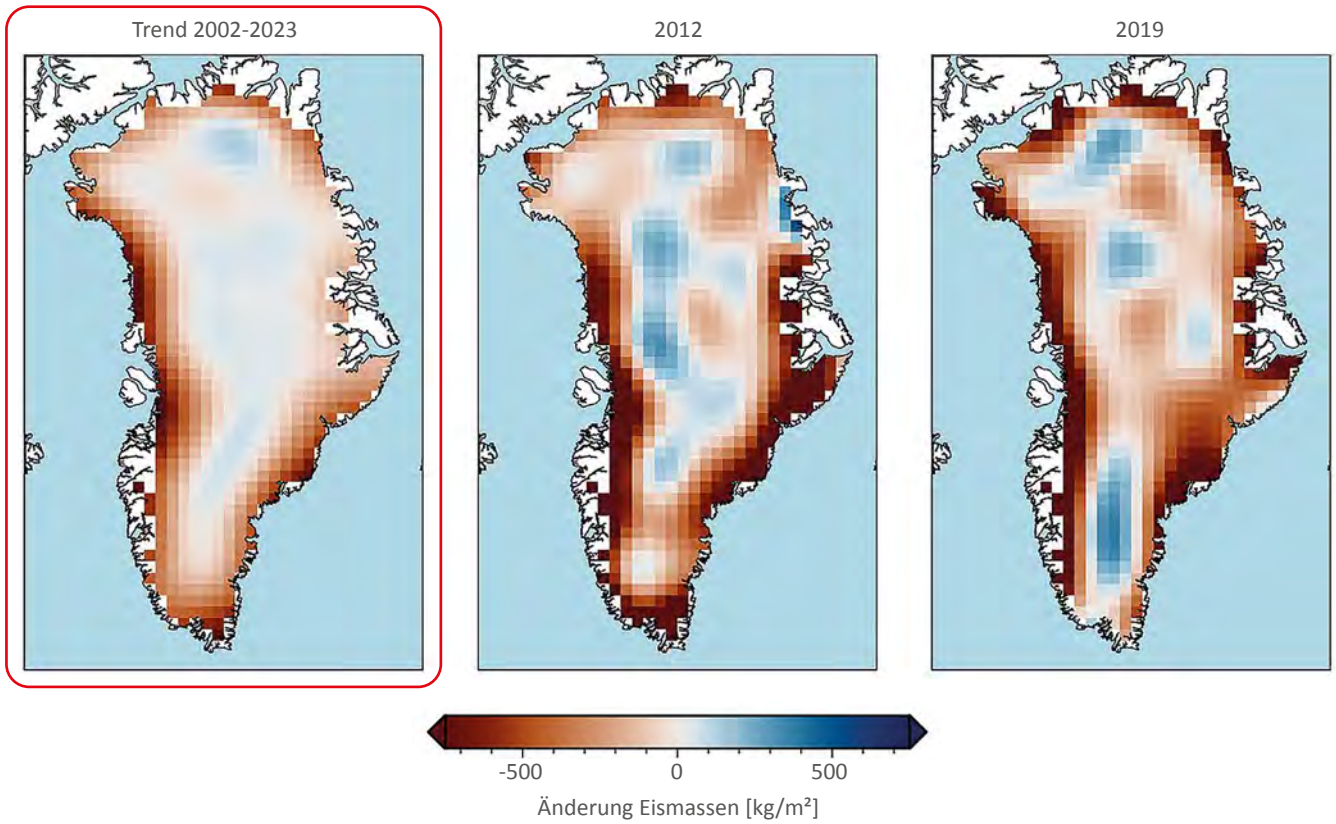
²³⁶ Vgl. dazu ausführlich auch: Bildungsserver Hamburg (2025, Grönländischer Eisschild).

²³⁷ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 4.

²³⁸ In diesem Sinne auch: scinexx.de (2021, Kippunkt): „Grönlandeis: Kurz vor dem Kippunkt? Teile des Eisschildes zeigen Frühwarnzeichen für eine Destabilisierung.“

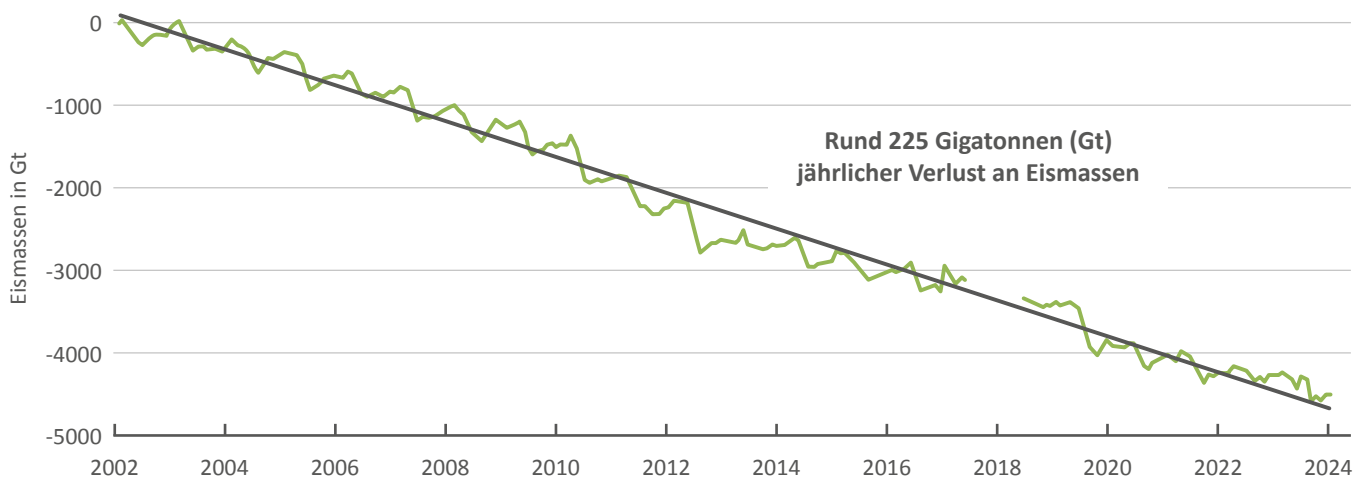
²³⁹ Niklas Boers vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und Martin Rypdal von der Arktischen Universität Norwegens in Tromsø; zitiert nach: scinexx.de (2021, Kippunkt); (Hervorhebungen durch Verfasser).

Abb. 26: Anhaltendes Abschmelzen des grönländischen Eisschildes



Quelle: Global Water Storage (2025, Eismassenverlust)

Abb. 27: Signifikanter Verlust an Eismassen in Grönland



Quelle: Global Water Storage (2025, Eismassenverlust)



**Erwärmung der Arktis
drastisch unterschätzt.**

Welt der Physik (2022, Erwärmung)



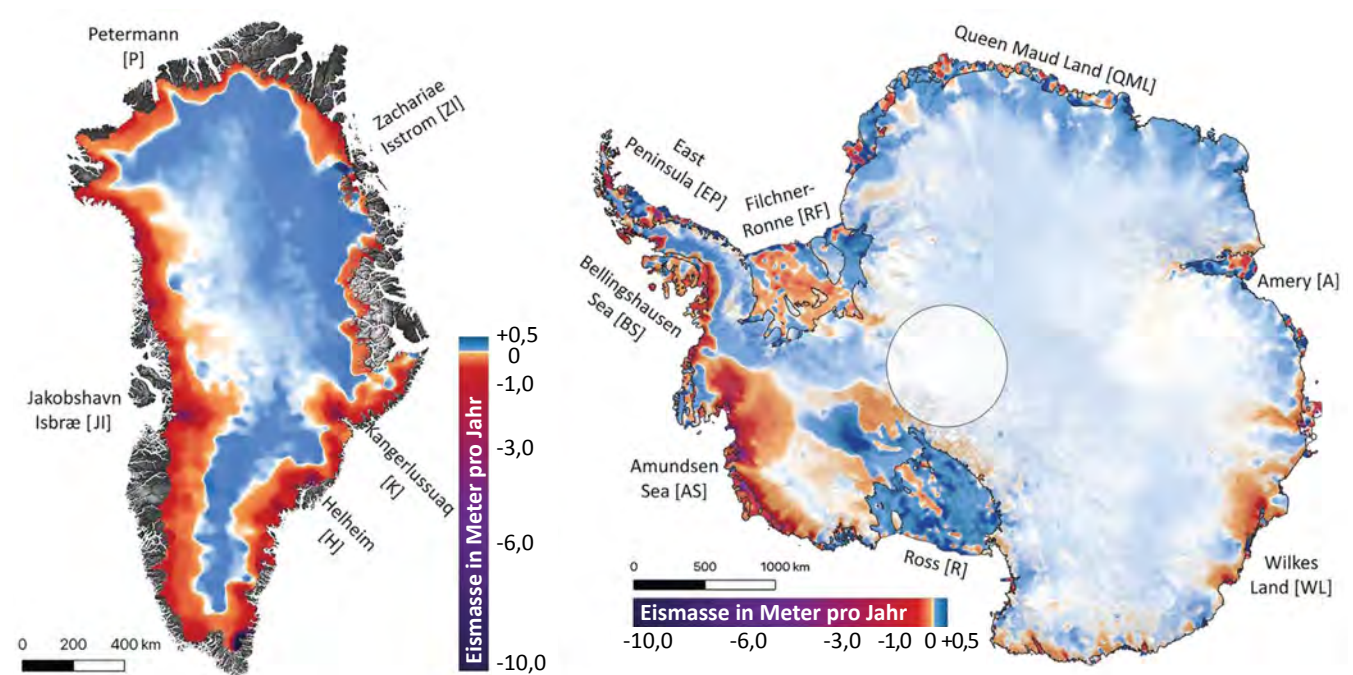
Speziell in **Grönland** schreitet der Verlust an Eismasse seit Jahren unaufhaltsam und mit wachsender Geschwindigkeit voran. Doch auch das **arktische Meereis** in der Nordpolregion taut immer schneller und verliert mit hoher Dynamik an Substanz, ebenso wie der Eisschild in der Antarktis (vgl. dazu überblickartig auch Abb. 28, 29 und 30).

- ▶ Nach einer Berechnung von Klimaforschern der *Max-Planck-Gesellschaft* (2024) „... haben die Eisschilde von Antarktis und Grönland zwischen 1992 und 2020 insgesamt 7.560 Milliarden Tonnen Eis verloren, das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von 20 Kilometern.“²⁴⁰

Unsicherheit besteht derzeit allerdings hinsichtlich der Frage, ob eine **rasche Abkühlung** bestimmter Regionen im Nordatlantik – hervorgerufen durch die adverse Dynamik der *Atlantischen Umlaufzirkulation* (AMOC) – die drohende „Kernschmelze“ beim Grönlandeis möglicherweise aufhalten, stabilisieren oder zumindest verlangsamen könnte.²⁴¹

Eine solche **negative Rückkopplung** scheint zumindest denkbar, worauf insbesondere *Wunderling et al.* (2021) deutlich hinweisen.²⁴²

Abb. 28: Weiträumige Eisverluste in Grönland und der Antarktis



Verluste an Eismasse in Meter pro Jahr (Zeitraum von 2003-2019)

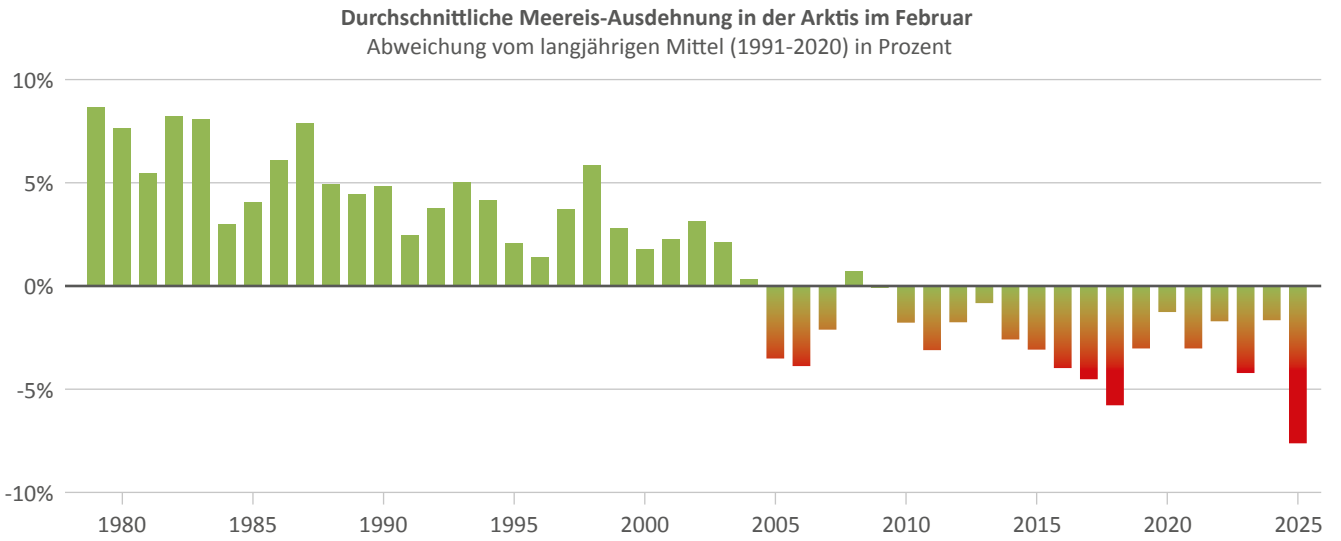
Quelle: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report)

²⁴⁰ MPG (2024, Schmelze).

²⁴¹ Vgl. dazu die Diskussion bei: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 33.

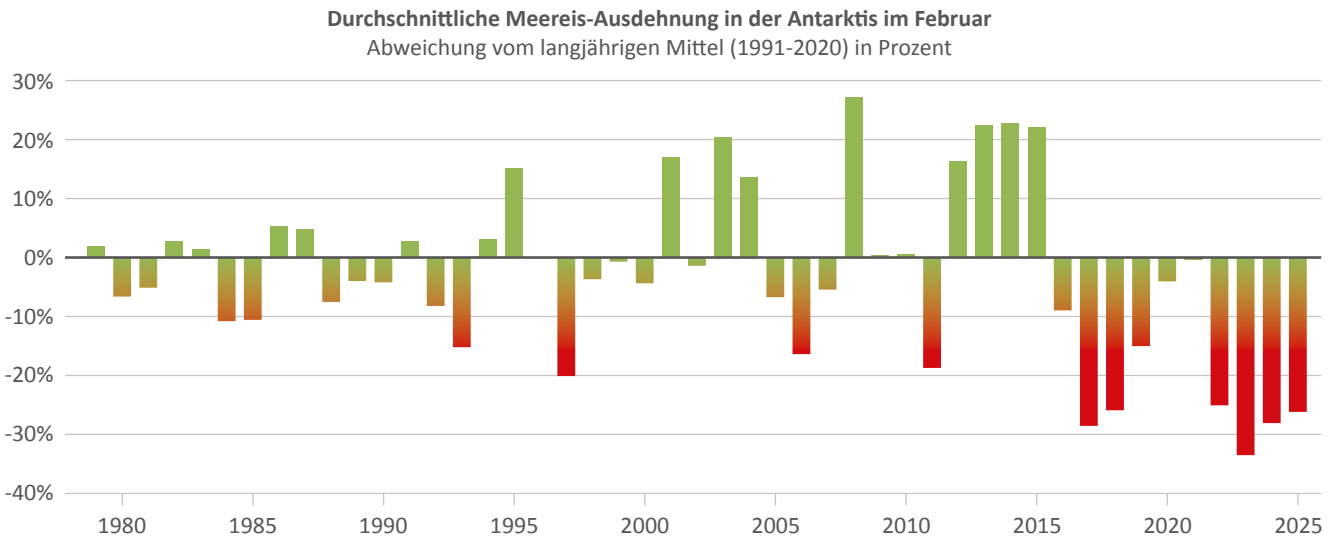
²⁴² Vgl. dazu ausführlich: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects). Ähnlich auch: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 33; demnach „... würde eine Abschwächung der Atlantischen Umwälzzirkulation allerdings zu einer Abnahme der Temperaturen um Grönland führen und somit den Grönländischen Eisschild stabilisieren. Daher wird davon ausgegangen, dass diese Elemente sich gegenseitig stabilisieren.“

Abb. 29: Rückgang des Meereises in der Arktis (seit 1980)



Quelle: ntv (2025, Antarktis); Daten von Copernicus Climate Change Service

Abb. 30: Rückgang des Meereises in der Antarktis (seit 1980)



Quelle: ntv (2025, Antarktis); Daten von Copernicus Climate Change Service

Zusätzlich zu der äußerst problematischen Einwirkung auf das globale Klimasystem hat die arktische Eisschmelze auch noch eine komplexe geopolitische und geoökonomische Dimension. Diese betrifft die zunehmende Vereinnahmung der Arktis durch revisionistische Großmächte (insbesondere Russland und China) und ist – insbesondere aus europäischer Sicht – ebenfalls sehr kritisch.²⁴³

Diesen Aspekt vertieft das FERI Cognitive Finance Institute in einer nachfolgenden Analyse, die ab Ende 2025 im Content Center des Instituts abrufbar sein wird.

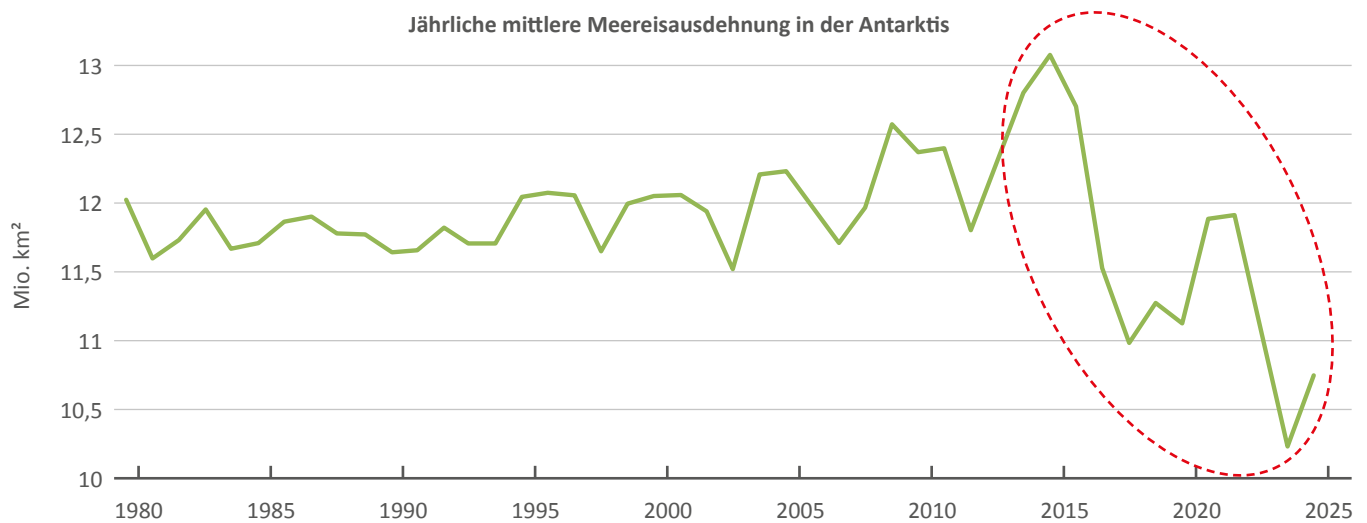


Westantarktis-Eisschild

Zwar weicht die Konstellation im **Eisschild der Westantarktis** in Teilen von den entsprechenden Grundmustern der Arktis ab – dennoch resultieren daraus letztlich sehr ähnliche Dynamiken. Diese bewirken auch im Gebiet der Antarktis einen beschleunigten und sich selbst verstärkenden Verlust großer Eismassen, was – über sinkende Werte der *Albedo* – ebenfalls die bekannten Folgewirkungen für das globale Klimasystem nach sich zieht.²⁴⁴

Wie Abb. 31 zeigt, zeigt auch das **antarktische Meereis** bereits deutliche Rückzugstendenzen; noch wesentlich bedrohlicher sind allerdings die zunehmenden Schmelzprozesse von Eisbergen und Gletschern im Bereich der **Westantarktis** (darunter insbesondere der *Thwaites-Gletscher* – auch bekannt als „Doomsday-Gletscher“).²⁴⁵

Abb. 31: Deutlicher Rückgang des antarktischen Meereises



Quelle: Copernicus (2025, Meereis)

²⁴³ Vgl. dazu etwa: Standard (2024, Arktis); sowie bereits überblickartig: Paul (2022, Nordpol). Dezidiert dazu auch: Copernicus (2025, Meereis), unter dem Rubrum „Geopolitische Veränderungen und Herausforderungen“: „Die Öffnung der Arktis wird strategische Regionen zugänglicher machen, was Fragen der Sicherheit und Souveränität aufwirft.“

²⁴⁴ Vgl. dazu überblickartig: ntv (2025, Antarktis); unter Verweis auf eine neue Forschungsstudie von Abram et al. (2025, Antartic): „So führe der Rückgang des Packeises in der Antarktis-Region dazu, dass weniger Sonneneinstrahlung reflektiert wird, was wiederum die Erderwärmung verstärkt.“

²⁴⁵ Vgl. dazu jeweils ausführlich: Copernicus (2025, Meereis); sowie: Science Media Center (2023, Westantarktis); Spektrum (2024, Weltuntergangs-Gletscher).

Gelegentlich zirkulieren zwar auch Aussagen, wonach sich die Eismasse in der Antarktis zuletzt sogar wieder erhöht habe – was die Kernthese der polaren Eisschmelze in Frage stellen würde. Derartige Studien basieren aber in der Regel nur auf relativ kurzen Analysephasen, in denen **natürliche Wetterphänomene** (wie starker Schneefall) die langfristigen Effekte der Eisschmelze überlagern.²⁴⁶

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass der Abschmelzprozess in der Westantarktis vor allem durch den Prozess der **ozeanischen Erwärmung** getrieben wird: Globale Meeresströmungen und ozeanische Zirkulationssysteme transportieren dabei große Mengen stark erwärmten Oberflächenwassers in den Bereich der Antarktis, wo sie dann **sukzessive Abtau- und Schmelzprozesse** in Gang setzen.²⁴⁷

Hinzu kommen in der Westantarktis aber noch spezifische **geologische und topographische Faktoren**, die bei bestimmten klimatischen Bedingungen ein **abruptes Abrutschen** von Eisbergen und Gletschermassen ins Meer auslösen oder begünstigen: „Diese spezielle geografische Situation führt dazu, dass der Eisschild aufgrund **bestimmter Fließprozesse** instabil werden kann, sobald sich das Eis – zum Beispiel als Folge wärmeren Ozeanwassers – einmal weit genug zurückgezogen hat: Dann setzt ein **selbstverstärkender Prozess** ein, der dazu führt, dass der Eisverlust sich beschleunigt.“²⁴⁸



In der Westantarktis ist der kritische Punkt möglicherweise schon überschritten.

Clemens Schannwell, Forscher am Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2024



Dieser charakteristische Prozess ist auch als „**MISI**“ („**Marine Ice Sheet Instability**“) bekannt: Dahinter steht das Phänomen, dass große Eismassen des sogenannten Eisschelfs, deren Grundlage auf dem Meeresgrund „ruht“ („*grounding*“), durch Vordringen von wärmerem Ozeanwasser zur sogenannten „*grounding line*“ beschleunigt abschmelzen. Die Bindung zum Meeresboden wird geschwächt, und große Eismassen können sich lösen und „aufschwimmen“ (die dann als Eisberge davontreiben). Als Folge davon zieht sich die „*grounding line*“ immer weiter zurück. Dadurch gelangt immer mehr Wasser unter den verbleibenden Eisschild, was den Prozess weiter fortsetzt und beschleunigt. Dieser Prozess ist umso stärker, je mehr der Landsockel landeinwärts nach unten geneigt ist.

- Damit ist der **MISI**-Effekt ein typischer „*Feedback-Mechanismus*“, der als **selbstverstärkende Instabilität** großen Einfluss auf die Dynamik der Eisschmelze in der Westantarktis hat.²⁴⁹

Die Summe dieser progressiv ablaufenden Effekte hat schon heute eine **rapide Erosion des westantarktischen Eisschilds** zur Folge, die wohl bereits unumkehrbar ist.²⁵⁰ Zu berücksichtigen sind dabei aber auch noch direkte oder indirekte **Interaktionen und Interdependenzen** mit anderen dynamischen Elementen des Erdsystems, ganz im Sinne des Grundprinzips einer komplexen und oftmals **nichtlinearen Gesamtdynamik**.²⁵¹ Entsprechend vorsichtig äußert sich **Umweltbundesamt** (2024) zur Antarktis-Problematik:

- „Starke Interaktionen vorausgesetzt, könnte der Westantarktische Eisschild demnach bereits bei einer **deutlich geringeren Erwärmung** kippen.“²⁵²

²⁴⁶ Vgl. den entsprechenden „Faktencheck“ zu Aussagen einer chinesischen Studie bei: DW (2025, Südpol).

²⁴⁷ Vgl. dazu ausführlich: unten, Kap. 5.3 sowie 5.5.

²⁴⁸ PIK (2025, Erdsystem); (Hervorhebungen durch Verfasser).

²⁴⁹ Vgl. dazu grundsätzlich: Weertmann, J. (1974, Stability); weiterführend auch: PIK (2023, Westantarktis).

²⁵⁰ Vgl. dazu etwa: MPG (2024, Schmelze); gleichlautend auch Clemens Schannwell, Klimaforscher am Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie, zitiert nach: MPG (2024, Schmelze). Vgl. dazu mit ausführlichen Daten und Grafiken auch: Bildungsserver Hamburg (2024, Antarktischer Eisschild). Ergänzend dazu auch aktuelle Beobachtungen zur Drift großer antarktischer Eisberge; vgl. dazu: ntv (2025, Eisberg).

²⁵¹ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 4.

²⁵² Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 234; (Hervorhebungen durch Verfasser).

Als besonders beunruhigend erweist sich dabei die Feststellung, dass die Schmelzprozesse der Antarktis – noch stärker als in der Arktis – einem **ausgeprägt nichtlinearen Verlaufsmuster** zu folgen scheinen, das auf **selbstverstärkenden Rückkopplungseffekten** („*amplifying feedbacks*“) zwischen wichtigen Komponenten basiert und eine weitere Beschleunigung der Eisschmelze erwarten lässt:

- ▶ „*A regime shift has reduced Antarctic sea-ice extent far below its natural variability of past centuries, and in some respects is **more abrupt, non-linear and potentially irreversible** than Arctic sea-ice loss. (...) **Amplifying feedbacks** are common between these abrupt changes in the Antarctic environment.*“²⁵³

Neuere Forschungsergebnisse liefern zuletzt tatsächlich verstärkt Indizien für einen **abrupten „Regimewechsel“** in der strukturellen Dynamik des antarktischen Eisschildes: Demnach finden in der Antarktis „... derzeit möglicherweise **drastische Veränderungen von Eismasse und Meeresströmungen** statt“, wobei „... sich die Verlangsamung der antarktischen Meeresströmung und das Schmelzen des Eisschildes **gegenseitig verstärken**.“²⁵⁴



... evidence is emerging for rapid, interacting and sometimes self-perpetuating changes in the Antarctic environment.

Abram et al. (2025, Antarctic)



Auch für den westantarktischen Eisschild unterstellen Klimaforscher derzeit mit Blick auf latente Kippunkte eine **Temperatursensitivität im Bereich von rund 1,5°** (1-3°) globaler Erwärmung.²⁵⁵

Da dieser Schwellenwert bereits annähernd erreicht wurde, zählt die Westantarktis zu den **besonders gefährdeten und zugleich kritischen Kippelementen** des Erdsystems.²⁵⁶

Ausschlaggebend dafür sind ihre enorme Bedeutung für den **Anstieg des Meeresspiegels** sowie eine möglicherweise massive **Veränderung bedeutender ozeanischer Strömungssysteme**.²⁵⁷

Neuere Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der kritische Kippunkt der Antarktis schon sehr bald überschritten sein könnte; dies würde einen **dynamischen und selbstverstärkenden Prozess** in Gang setzen – mit der Folge eines weiteren rapiden Abschmelzens und: „... *potentially initiating global tipping cascades*“.²⁵⁸

Gesamtbedeutung und Wirkungsebenen

Die Summe dieser Einschätzungen und Ergebnisse ist kaum hoch genug zu veranschlagen, denn:

Der Grönland-Eisschild, der westantarktische Eisschild sowie das arktische Winter-Meereis – als drei maßgebliche Kippelemente der Kryosphäre – haben **enormen Einfluss** auf die weitere Entwicklung des Erdsystems und der globalen Klimaveränderungen!

Diese systemische Transmission erfolgt grundsätzlich über **zwei unterschiedliche Wirkungsebenen**:

²⁵³ Abram et al. (2025, Antarctic); (Hervorhebungen durch Verfasser).

²⁵⁴ Vgl. dazu Überblickartig: ntv (2025, Antarktis); (Hervorhebungen durch Verfasser); unter Verweis auf eine neue Forschungsstudie von: Abram et al. (2025, Antarctic). Vgl. dazu ähnlich auch: Zeit (2025, Antarktis).

²⁵⁵ Vgl. dazu: PIK (2025, Erdsystem): „*Der globale Temperatur-Schwellenwert für solch einen Kippprozess wird auf 1,5°C (1-3°C) geschätzt.*“

²⁵⁶ Vgl. dazu übereinstimmend: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken); PIK (2025, Erdsystem). Spezifisch und auf Grundlage neuer Forschungsergebnisse auch: PIK (2025, Eisschild).

²⁵⁷ Vgl. dazu grundlegend bereits: oben, gesamtes Kapitel; sowie weiterführend auch: unten, Kap. 5.3.

²⁵⁸ Vgl. in diesem Sinne etwa die neu erschienene Analyse von: Abram et al. (2025, Antarctic).

1. Direkte Konsequenzen

Zum einen führt jeder größere Abschmelzprozess polarer Eismassen zwingend – und als sehr **direkte Konsequenz** – zu einem deutlichen **Anstieg des weltweiten Meeresspiegels**. Dieser Effekt ist derzeit bereits klar nachgewiesen und sogar relativ präzise messbar (etwa durch Satellitenbeobachtung; vgl. dazu auch Abb. 32, S. 70).²⁵⁹

Aus heutiger Sicht wird sich dieser Meeresspiegelanstieg in den nächsten Jahren ungebremst fortsetzen und beschleunigen.

- ▶ Wie neuere Messungen und Modellrechnungen verdeutlichen, hat speziell die **Eisschmelze in Grönland** daran einen **deutlich überproportionalen Anteil**.²⁶⁰
- ▶ Demnach „... könnte allein das Schmelzwasser der drei größten Gletscher Grönlands bis 2100 den Meeresspiegel um 9,1 bis 14,9 Millimeter anheben.“²⁶¹



So schnell sind die Wasserstände in den zurückliegenden 3000 Jahren nicht angestiegen.

World Ocean Review (2024, Klimakrise)



Aus der aktuellen Dynamik der Eisschmelze in Grönland sowie der Westantarktis resultiert eine klare – wenngleich äußerst unschöne – Perspektive:

- ▶ „Beide großen Eisschilde der Welt werden mit zunehmender Erwärmung mehr Eis verlieren und verstärkt zum Anstieg des globalen Meeresspiegels beitragen.“²⁶²

Aktuelle Schätzungen führender Klimaforscher, dargelegt im letzten Sachstandsbericht von IPCC (2023), erwarten ein Anstiegsniveau von **38-77 cm** bis zum Ende des Jahrhunderts.²⁶³ *World Ocean Review* (2024) hält jedoch im gleichen Zeitraum auch einen Anstieg von **rund 1 m** für denkbar.²⁶⁴ Selbst dieser Wert könnte jedoch, nach Berücksichtigung zahlreicher (heute bereits nachweisbarer) **Rückkopplungs- und Verstärkungseffekte**, signifikant überschritten werden.²⁶⁵

- ▶ Zur grundsätzlichen Einordnung zeigt Abb. 32 (S. 70) den bisherigen Trendverlauf.²⁶⁶

Als weitere unmittelbare Konsequenz der polaren Eisschmelze resultiert ein im Zeitablauf deutlich steigender **Eintrag von Süßwasser** in die Weltmeere. Dieser Effekt reduziert den Salzgehalt der Ozeane und führt zu einer spürbaren **Veränderung bisheriger Dichte- und Schichtungsvariablen** – vor allem im Nordatlantik sowie im Südpazifik. Als Folge davon ändert sich auch die Dynamik der sogenannten *Thermohalinen Zirkulation*, die wiederum ursächlich ist für den Verlauf grundlegender globaler Meeresströmungen. Dies spielt auch – und insbesondere – im Kontext der *Atlantischen Umwälzzirkulation*

²⁵⁹ Nach einer Berechnung von Klimaforschern der *Max-Planck-Gesellschaft (MPG)* „... haben die Eisschilde von Antarktis und Grönland zwischen 1992 und 2020 insgesamt 7560 Milliarden Tonnen Eis verloren (...). Dadurch ist der Meeresspiegel um 21 Millimeter gestiegen, wobei Grönland den größten Teil, rund 13,5 Millimeter, beigesteuert hat.“; vgl. dazu: MPG (2024, Schmelze). Analog auch: Stokes et al. (2025, Warming): „Mass loss from ice sheets in Greenland and Antarctica has quadrupled since the 1990s and now represents the dominant source of global mean sea-level rise from the cryosphere.“

²⁶⁰ Vgl. dazu ausführlich: scinexx.de (2020, Prognosen); MPG (2024, Schmelze); analog und mit weiteren Daten auch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 17-20.

²⁶¹ scinexx.de (2020, Prognosen). Analog auch Science Media Center (2020, Grönlandeis): „Generell besteht (...) keinerlei Zweifel an der Tatsache, dass das Eis in Grönland immer schneller in immer größerem Umfang schmilzt und dabei einen großen Anteil zum Anstieg des Meeresspiegels beiträgt.“

²⁶² World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 17.

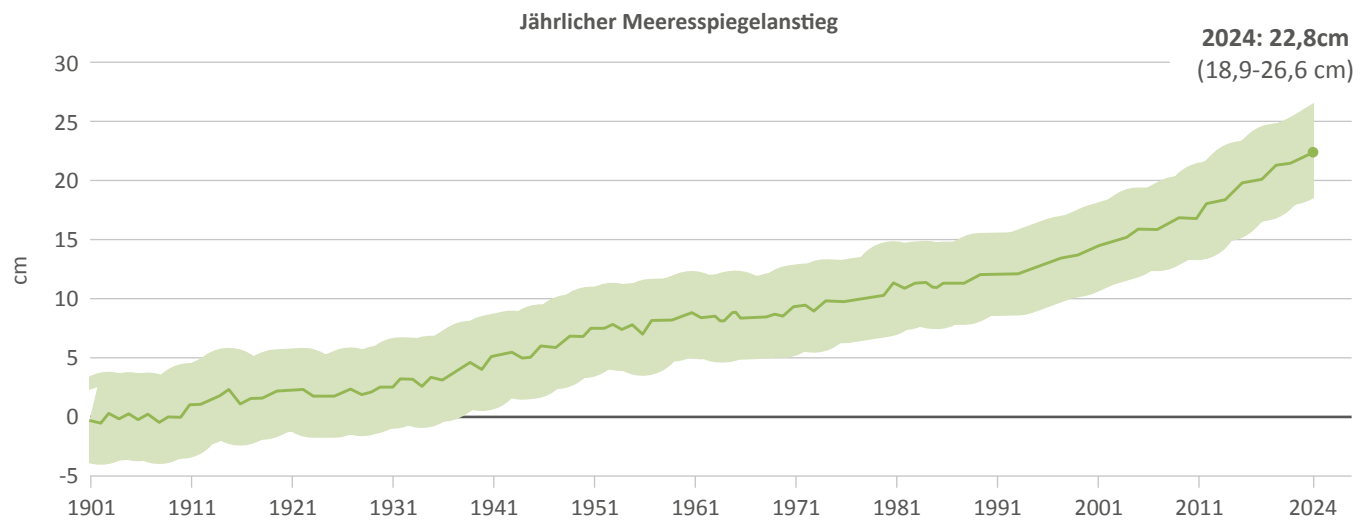
²⁶³ „Die Spanne der möglichen Anstiegsszenarien reicht von zusätzlichen 18 bis 23 Zentimetern bis zum Jahr 2050. Für das Ende des Jahrhunderts wird ein Anstieg von 38 bis 77 Zentimetern erwartet.“; World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 17-19; unter Bezugnahme auf IPCC (2023, Report).

²⁶⁴ Vgl. dazu: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 20.

²⁶⁵ Für diese Einschätzung sprechen nicht nur die Ergebnisse neuerer Forschungen, die nahezu immer eine *Aufwärtsrevision* (Verschärfung) vorheriger Erwartungen und Prognosen nach sich ziehen, sondern auch die Mehrzahl der aktuellen Kippdynamiken (wie im Rahmen der vorliegenden Analyse dargestellt).

²⁶⁶ Vgl. dazu: Climate Change Tracker (2025, Emissions); mit ausführlichen Prognosedaten dazu auch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 20-21.

Abb. 32: Signifikante Erhöhung des Meeresspiegels durch globale Eisschmelze



Quelle: Climate Change Tracker (2025, Emissions)

(AMOC) eine sehr wichtige Rolle, da diese im Erdsystem als **eigenständiges Kippelement** agiert und folglich hochsensitiv ist gegenüber negativen externen Einflussfaktoren.²⁶⁷

Die dritte unmittelbare Auswirkung der polaren Eisschmelze – vermutlich sogar die gravierendste – ist eine spürbare **Verstärkung und Beschleunigung der globalen Erwärmung**. Dieser Effekt entsteht vorrangig aus der rückläufigen polaren *Albedo*, da von schwindenden Eisflächen immer weniger Sonnenlicht (und damit Wärmestrahlung) von der Erdoberfläche zurückreflektiert werden kann. Dieser Prozess folgt sehr klar dem Prinzip einer **positiven Rückkopplung** und gewinnt somit (als nichtlineare Progression) im Zeitablauf ständig an Dynamik und Intensität.²⁶⁸



... we find that global warming is increased by the decay of the Earth's cryosphere.

Wunderling (2021, Dynamiken)



2. Indirekte Konsequenzen

Über die unmittelbaren Effekte hinaus rufen die polaren Schmelzprozesse auch eine Vielzahl **indirekter Konsequenzen** hervor, ausgelöst durch komplexe systemische Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekte. Hierzu zählen insbesondere:

- Umkehrung wichtiger ozeanischer **Strömungen** (↔ Einfluss über *Thermohaline Zirkulation*)
- Zunahme globaler **Extremwetterereignisse** (↔ schwächerer atmosphärischer Polarwirbel)
- Mögliche Abschwächung des **Golfstroms** (↔ Störung der Nordatlantik-Zirkulation AMOC)
- Mögliche Störung globaler **Windsysteme** (↔ atmosphärische und ozeanische Erwärmung)
- Mögliche Schwächung der polaren **Jetstreams** (↔ überproportionale arktische Erwärmung)
- Mögliche Veränderung der **CO₂-Bindungskapazität** im Meer (↔ Wirkung noch unklar)
- Mögliche Veränderung der ozeanischen **Wärmespeicherung** (↔ Wirkung noch unklar)

²⁶⁷ Der AMOC-Experte *Stefan Rahmstorf* erklärt den entsprechenden Zusammenhang: „If the northern Atlantic becomes less salty because of an inflow of freshwater (rain or meltwater), the water becomes less dense and the AMOC slows down.“; Rahmstorf (2024, Tipping Point), S. 18. Vgl. dazu ausführlich: unten, Kap. 5.3.

²⁶⁸ Dieser Effekt wurde bereits ausführlich erörtert; vgl. dazu: oben, vorherige Abschnitte.

Diese bereits sehr umfangreiche Aufzählung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit weder vollständig noch deckt sie alle möglichen **Interdependenzen zweiter und dritter Ordnung** ab. Daraus folgt, dass als Folge der polaren Schmelze zunächst weitere – relativ klar erkennbare – Folgewirkungen entstehen (wie etwa eine Veränderung ozeanischer Strömungen), daraus jedoch nachfolgend – über die komplexen Interdependenzen und Rückkopplungen innerhalb des globalen Klimasystems – noch **weitere kritische Effekte auch in anderen Bereichen** ausgelöst werden können.²⁶⁹

- ▶ Derartige Auswirkungen zweiter oder dritter Ordnung sind derzeit allenfalls rudimentär erfasst; sie werden deshalb in vielen Klimamodellen und Simulationen nicht systematisch berücksichtigt und bleiben folglich oftmals eine „unbekannte Größe“.²⁷⁰
- ▶ Effekte zweiter und dritter Ordnung können jedoch prinzipiell dann von großer Bedeutung sein, wenn durch ihre jeweilige Veränderung auch in anderen Teilbereichen kritische Prozesse und Risikokaskaden „angestoßen“ werden.²⁷¹

Genau hier liegt ein **grundlegendes Problem der Klimaforschung**, die wohl auch deshalb immer wieder mit „überraschenden“ Dynamiken oder „unerklärlichen“ Klimaeffekten konfrontiert wird.²⁷²

(Vgl. zu diesen komplexen Zusammenhängen auch die schematische Darstellung in Abb. 33 auf S. 72; sowie indikativ bereits oben, Abb. 17 auf S. 45 in Kap. 4.5).

Direkte und indirekte Interdependenzen mit anderen Kippelementen und Kippdynamiken:

Starke Auswirkung der **Grönland-Eisschmelze** auf **Atlantische Umwälzzirkulation** (▷ Abschwächung).

Moderate Auswirkung der **Grönland-Eisschmelze** auf **Westantarktis-Eisschmelze** (▷ Verstärkung; über Meeresspiegelanstieg, in beide Richtungen).

Unklare Auswirkung der **Westantarktis-Eisschmelze** auf **Atlantische Umwälzzirkulation** (▷ gegenläufige Effekte).

Indirekte Auswirkungen auf **Amazonas-Regenwald** (▷ primär über Veränderung der **Atlantischen Umwälzzirkulation** und dadurch bewirkte Veränderungen in der Atmosphärenzirkulation).

Insgesamt: Klare Interdependenz/Verstärkung/Rückkopplung mit **Erderwärmung**.



Polar ice sheets are approaching tipping points, committing the world to several metres of irreversible sea-level rise that will affect hundreds of millions.

University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report)



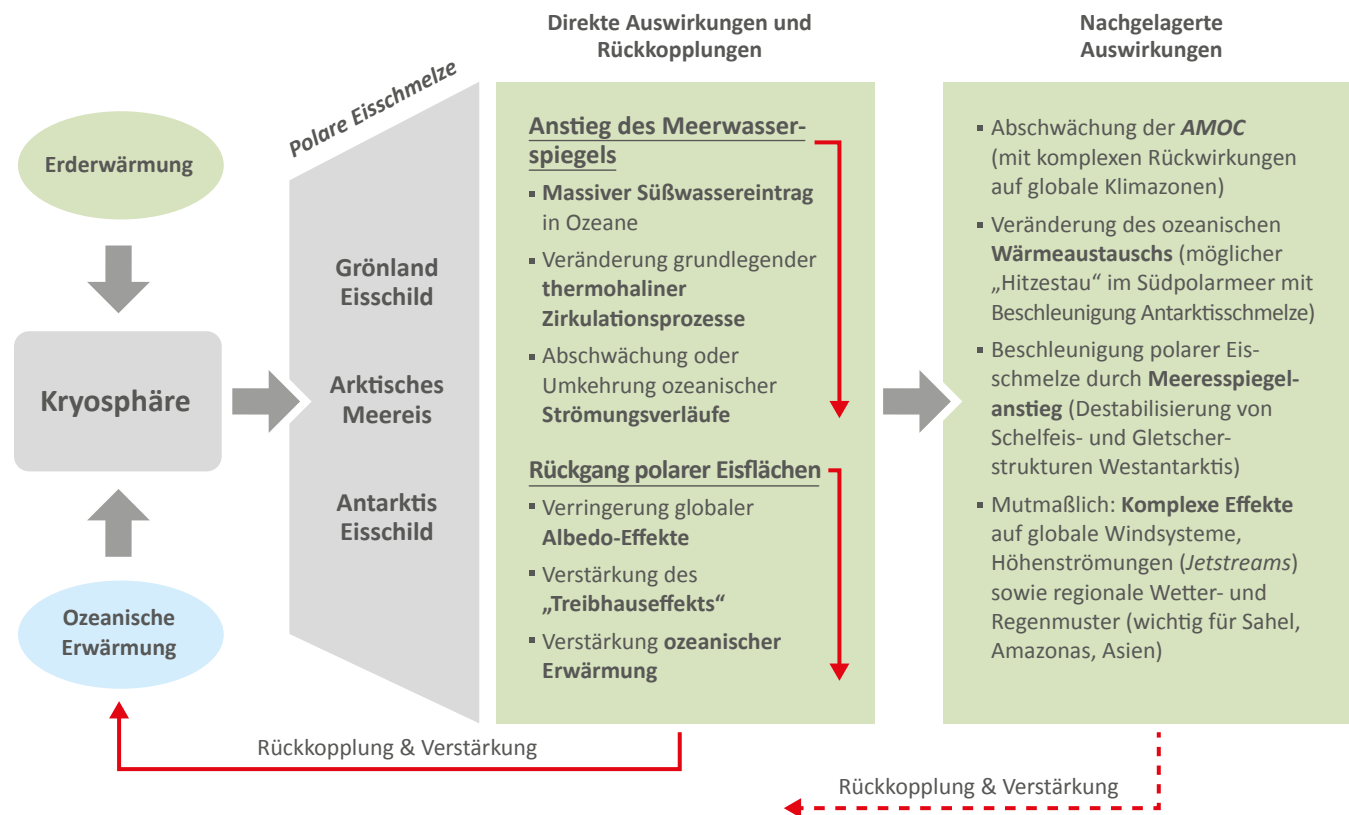
²⁶⁹ Vgl. zu diesen Grundeigenschaften des Erdsystems („Komplexität“, „Interdependenz“, „Feedback“, „Nichtlinearität“) ausführlich bereits: oben, Kap. 4.

²⁷⁰ Auf diesen Aspekt verweisen explizit: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects).

²⁷¹ Dieser Aspekt dürfte speziell für die enge Beziehung zwischen polarer Eisschmelze und möglichen Störungen der *Atlantischen Umwälzzirkulation* (AMOC) eine signifikante Rolle spielen, denn: Letztere ist ein eigenständiges Kippelement im Erdsystem, mit bereits klar erkennbarer Negativdynamik! Ähnliche Interdependenzen auch in anderen Bereichen, die bislang aber noch nicht bekannt oder erforscht sind, scheinen zumindest plausibel.

²⁷² Dies gilt ganz besonders für viele Prognosen zum Abtauen des Grönlandeises. Der Klimawissenschaftler *Shfaqat Khan* von der *Technischen Universität Dänemark* erklärt dazu: „*Offensichtlich unterschätzen die gängigen Modelle den Worst-Case-Eisverlust dieser Gletscher – und das gilt wahrscheinlich auch für den Rest Grönlands.*“; zitiert nach: scinexx.de (2020, Prognosen). Vgl. dazu grundsätzlich auch bereits: oben, Kap. 5.2.

Abb. 33: Komplexe Grundmechanismen und Auswirkungen der polaren Eisschmelze



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung

5.3 Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC) und Subpolarer Wirbel (SPG)

Ein speziell für das Klima in Europa sehr wichtiges Kippelement ist die „**Atlantische Umwälzzirkulation**“ oder in Kurzform **AMOC** („Atlantic Meridional Overturning Circulation“). Die AMOC ist Teil eines planetaren Strömungssystems, das – ähnlich wie ein „ozeanisches Fließband“ („global conveyor belt“) weltweite Meeresströmungen von unterschiedlicher Temperatur und Dichte über den gesamten Planeten transportiert.²⁷³

- ▶ Die wichtigsten Einflussfaktoren und Antriebskräfte dieser Zirkulation sind primär **Temperaturdifferenzen** zwischen „warmen“ und „kalten“ ozeanischen Schichten sowie **strukturelle Effekte**, die aus dem jeweiligen Salzgehalt sowie der Dichte des Wassers resultieren.²⁷⁴
- ▶ Das Zusammenspiel dieser Faktoren erzeugt eine **spezifische planetare Strömungsdynamik** – auch bekannt als „**Thermohaline Zirkulation**“.²⁷⁵

²⁷³ Vgl. dazu ausführlich etwa: NOAA (2024, Conveyor); sowie: NOAA (2024, AMOC).

²⁷⁴ Vgl. dazu ausführlich etwa: NOAA (2024, Conveyor); NOAA (2024, Belt).

²⁷⁵ Vgl. dazu ausführlich: NOAA (2024, Circulation): „... deep-ocean currents are driven by differences in the water’s density, which is controlled by temperature (thermo) and salinity (haline). This process is known as thermohaline circulation.“; grundlegend dazu auch: Rahmstorf (2024, Tipping Point).

Die **Thermohaline Zirkulation (THZ)** definiert ein globales Strömungssystem in den Ozeanen, das durch Unterschiede in Temperatur (*thermo*) und Salzgehalt (*halin*) angetrieben wird. Kaltes, salzreiches Wasser sinkt in polaren Regionen in die Tiefe und strömt entlang des Meeresbodens zur Antarktis und von dort weiter Richtung Äquator. Dort erwärmt es sich und steigt an die Oberfläche. Das wärmere Oberflächenwasser verteilt sich – etwa über den Golfstrom – in andere Regionen und fließt zurück in Richtung der arktischen Polarregion. Diese Dynamik spielt eine zentrale Rolle im globalen Klimageschehen, da sie Wärmeenergie in enormem Umfang über die Weltmeere verteilt und damit grundlegende Wind- und Wetterphänomene auslöst oder beeinflusst.

Die **Corioliskraft** ist eine der drei Trägheitskräfte der klassischen Mechanik und wird von der Erdrotation hervorgerufen. Sie entsteht, weil sich verschiedene Punkte der Erdoberfläche mit unterschiedlicher Geschwindigkeit um die Erdachse bewegen. Dadurch werden Objekte auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links gelenkt. Dieser Effekt beeinflusst maßgeblich den Verlauf sowie die Dynamik planetarer Meeresströmungen und Windrichtungen.

Thermohaline Zirkulation und Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC)

Neben der aus der Erdumdrehung resultierenden „Corioliskraft“ sowie der Anziehungskraft des Mondes ist vor allem die globale **Thermohaline Zirkulation (THZ)** verantwortlich für die Dynamik der planetaren Meeresströmungen. Aus dieser Dynamik resultieren, zumindest unter „normalen“ Klimabedingungen, relativ **stabile ozeanische Strömungsläufe** (vgl. dazu Abb. 34, S. 74):

- ▶ Dabei wird Meerwasser im Bereich des Äquators erwärmt und in Richtung Nordatlantik transportiert. Dort kühlt das Wasser ab und sinkt in tiefere Regionen ab. Die kalten und relativ salzhaltigen Meeresteile wandern dann am Meeresgrund vom Nordatlantik bis zur Antarktis. Dort werden sie erneut mit kaltem und salzhaltigem Tiefenwasser „aufgeladen“ und strömen zurück in Richtung Äquator.²⁷⁶
- ▶ Daraus entsteht ein neuer **dynamischer Strömungsprozess**, der im Rahmen einer globalen Zirkulation erwärmtes Oberflächenwasser wieder zurück in Richtung Nordhalbkugel führt – etwa in Form des für Europas Klima sehr wichtigen **Golfstroms**.²⁷⁷ (Vgl. dazu Abb. 34, S. 74).

Das Grundprinzip dieser Strömungssysteme ist also relativ einfach:

- ▶ „Südlich und östlich von Grönland taucht kaltes und aufgrund seines hohen Salzgehalts schweres Wasser ab und strömt in der Tiefe gen Süden. In der Gegenrichtung fließt warmes Wasser an der Meeresoberfläche aus den Tropen gen Norden.“²⁷⁸

Um die Bedeutung des **Golfstroms** als massive Strömung mit enormer Umschlagkapazität zu verdeutlichen, hilft folgender eindrucksvolle Vergleich:

- ▶ „In den geographischen Breiten, in denen sich diese Wasserwalze besonders schnell bewegt, transportiert sie zusammengerechnet in einer Sekunde fast zwanzigmal mehr Wasser als alle Flüsse der Welt in derselben Zeit ins Meer tragen.“²⁷⁹

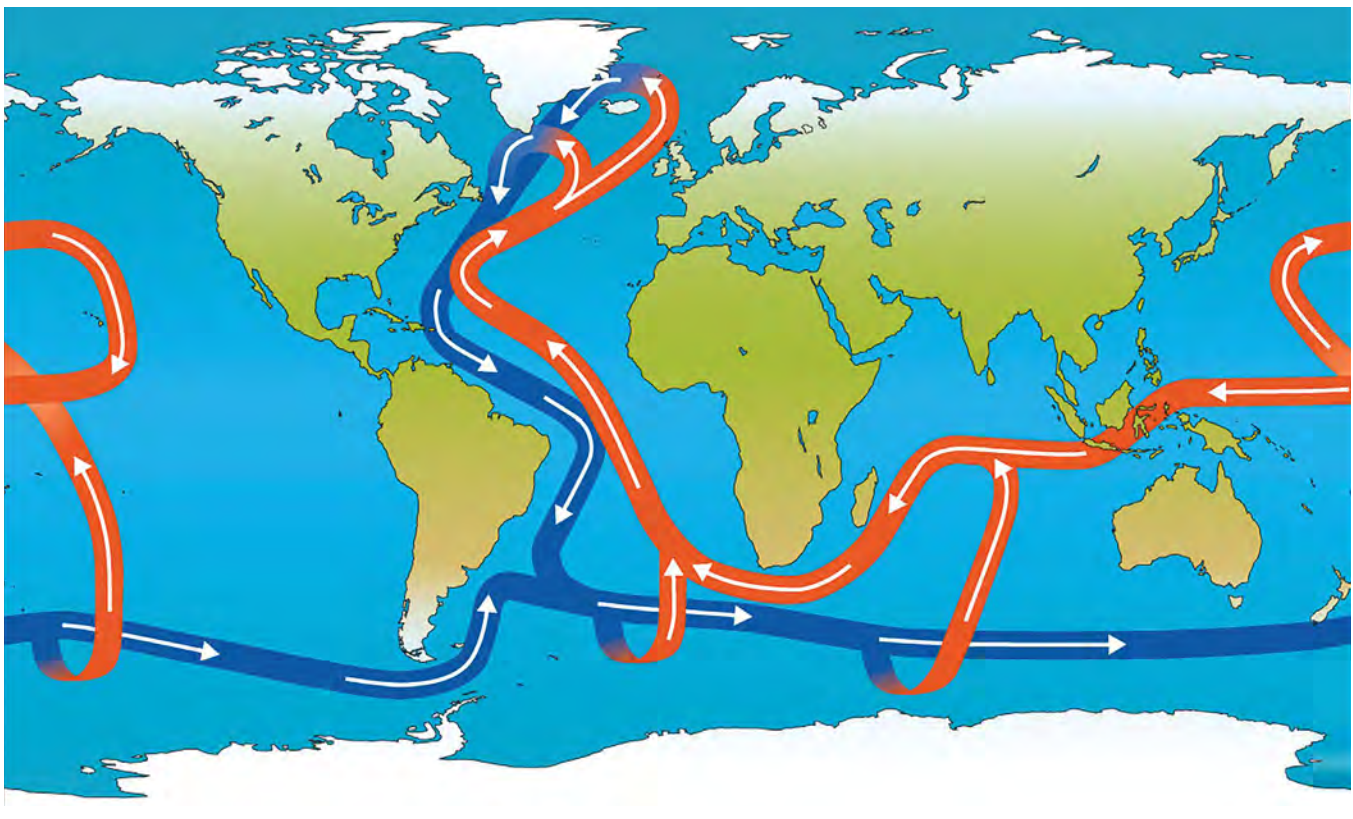
²⁷⁶ Vgl. zur Funktionsweise und grundlegenden Dynamik der *Globalen Thermohalinen Zirkulation* ausführlich: GEOMAR (2022, Strömungssystem); NOAA (2024, Circulation); NOAA (2024, Conveyor); sowie bereits grundlegend: Rahmstorf (1996, Circulation); Rahmstorf (2023, Atlantikzirkulation).

²⁷⁷ Vgl. mit Blick auf das Golfstrom-System speziell: PIK (2021, Golfstrom-System); dort auch der Klimaexperte *Stefan Rahmstorf*: „Das Golfstrom-System funktioniert wie ein riesiges Förderband, das warmes Oberflächenwasser vom Äquator nach Norden transportiert und kaltes, salzarmes Tiefenwasser zurück in den Süden schickt.“

²⁷⁸ GEOMAR (2022, Strömungssystem).

²⁷⁹ GEOMAR (2022, Strömungssystem).

Abb. 34: Schematische Darstellung der globalen Thermohalinen Zirkulation



Quelle: MET Office (2024, Circulation)



Das Golfstrom-System funktioniert wie ein riesiges Förderband, das warmes Oberflächenwasser vom Äquator nach Norden transportiert und kaltes, salzarmes Tiefenwasser zurück in den Süden schickt.

Stefan Rahmstorf, Leiter Erdsystemanalyse,
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 2021



In einer speziellen Darstellung verdeutlicht Abb. 35 den Transport von Oberflächenwasser, das in der äquatornahen Region erwärmt wurde, über den *Golfstrom* weiter in Richtung Nordatlantik.

Die globale THZ zählt nach Einschätzung führender Klimawissenschaftler zu den **bedeutendsten Elementen** des planetaren Klimageschehens: So sorgt die THZ etwa im **Pazifik** für die Entstehung großflächiger Verdunstung und Wolkenbildung, was ein wichtiger Treiber für Phänomene wie den *Monsunregen* ist. Im **Atlantik** transportiert die THZ über die AMOC und den *Golfstrom* stark erwärmtes Oberflächenwasser aus der Karibik in Richtung Nordeuropa – was wie eine „*Wärmepumpe*“ wirkt und sogar in Norwegen für ungewöhnlich milde klimatische Verhältnisse sorgt.²⁸⁰

► Speziell dieser „*nordatlantische Wärmekreislauf*“ unter Einbeziehung des *Golfstroms* ist von zentraler Bedeutung für die heutigen gemäßigten Klimaverhältnisse in weiten Teilen Europas; darüber hinausgehend wirkt er jedoch auch steuernd und regulierend auf eine Vielzahl anderer globaler Klimasysteme.²⁸¹

²⁸⁰ Vgl. dazu etwa: ARD alpha (2024, Wärmepumpe).

²⁸¹ Vgl. dazu ausführlich: unten, Ausführungen dieses sowie nachfolgender Kapitel.

Neben ihrer Funktion als „Motor“ ozeanischer Strömungssysteme dient die THZ auch noch als „physikalische Pumpe“ im Rahmen des globalen Kohlenstoffkreislaufs: Indem sie an der Oberfläche aufgenommene CO₂-Emissionen in tiefere Regionen transportiert, ermöglicht die THZ auch eine bessere Verteilung und längerfristige Speicherung der in den Ozeanen gebundenen Treibhausgase.²⁸²

Allerdings wirken das Ausmaß der im Meer gebundenen Kohlenstoffe sowie die damit verbundene Erwärmung unmittelbar zurück auf das System ozeanischer Temperaturunterschiede und mariner Schichten, das seinerseits als zentraler Treiber hinter der THZ agiert.²⁸³

- Hier liegt ein weiteres eindrucksvolles Beispiel für das **Prinzip multipler Interdependenzen und wechselseitiger Rückkopplungseffekte** innerhalb des globalen Klimasystems.²⁸⁴

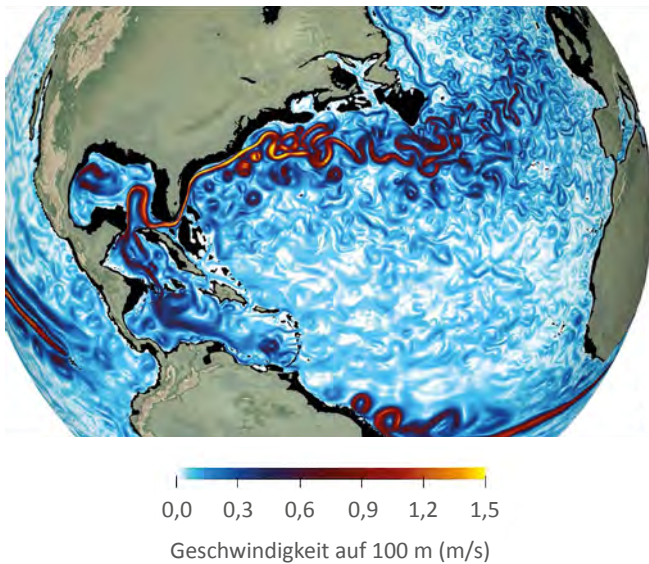


Die atlantische meridionale Umwälzkulation (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) spielt eine wichtige Rolle bei der Steuerung des Klimas und der Verteilung von Wärme und Nährstoffen im Atlantik.

AWI (2025, AMOC)



Abb. 35: Wärmetransport im Nordatlantik durch die AMOC



Quelle: GEOMAR (2022, Strömungssystem)

Abb. 36: Schematische Darstellung der AMOC als „Nordatlantischer Wärmekreislauf“



Quelle: Caesar et al. (2018, Fingerprint)

²⁸² Vgl. dazu etwa: DWD (2022, Kohlenstoffkreislauf), (Autor: A. Körtzinger).

²⁸³ Vgl. dazu etwa: GEOMAR (2025, Meeresströmungen).

²⁸⁴ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 4.4-4.5.

*Kritische Dynamik im Nordatlantik –
Phänomen des „Subpolaren Wirbels“*

Obwohl die AMOC ihren Ursprung auf der Nordhalbkugel hat, wären mögliche Veränderungen dieser Strömungsdynamik von **entscheidender Bedeutung** nicht nur für die nördliche Hemisphäre, sondern – wegen ihres wichtigen Beitrags zur weltweiten THZ – auch für das gesamte globale Klimageschehen.

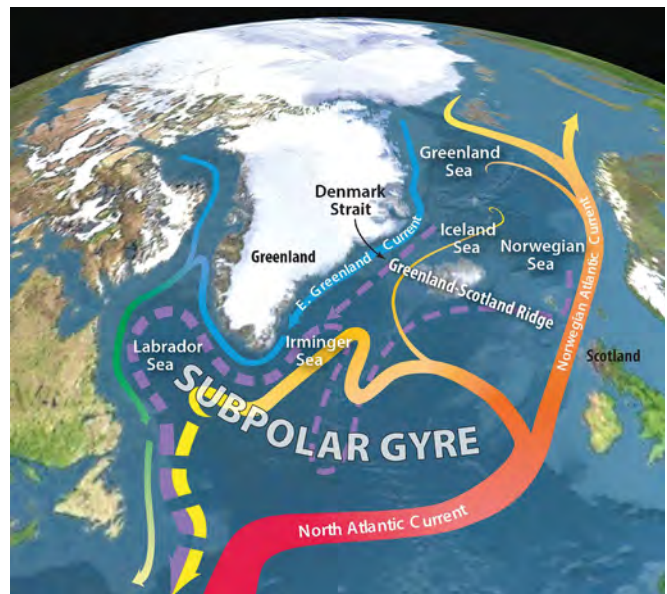
Im Zentrum der AMOC steht wiederum eine **spezifische ozeanische Zirkulation**, die im Nordatlantik in der Region um Labrador sowie des im Süden Grönlands liegenden Irminger-Meers verläuft.

- Diese spezielle Meeresregion und deren spezifische Dynamik als wichtige nordatlantische Meereskonvektion werden auch unter dem Begriff „**Subpolarer Wirbel**“ (Subpolar Gyre/SPG) zusammengefasst.²⁸⁵ (Vgl. dazu Abb. 37).

Der Nordatlantische Subpolare Wirbel ist von eminenter Bedeutung für die Funktionsweise und die Stabilität der Nordatlantischen Umwälzzirkulation, denn: Der SPG ist maßgeblich für den „Umschlag“ ozeanischer Strömungen von unterschiedlicher Temperatur und Dichte und insbesondere für die Ansammlung und das **Absinken von salzreichem Tiefenwasser**. Dieser Prozess ist der wichtigste physikalische Antriebsfaktor für die Dynamik der THZ im Nordatlantik.²⁸⁶

- Damit ist der SPG im Nordatlantik der zentrale „**Motor**“ nicht nur für die AMOC, sondern gleichzeitig auch der **wichtigste Regulator** für alle nachgelagerten und von der AMOC abhängigen Teilsysteme des Weltklimas! (Vgl. Abb. 38).

Abb. 37: Wirkungsweise und Relevanz des „Subpolaren Wirbels“



Quelle: Rahmstorf (2024, Tipping Point)

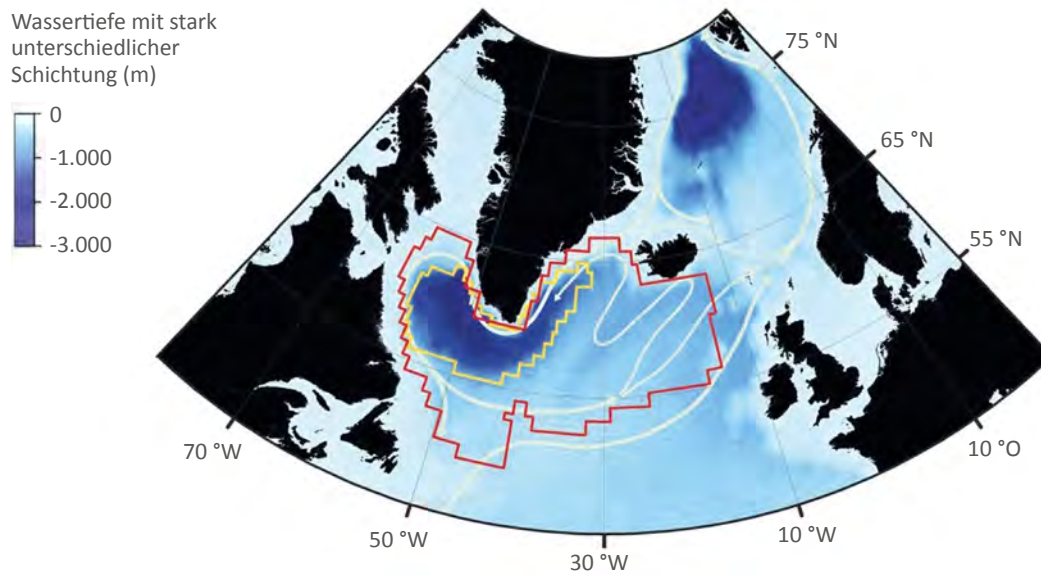
Der **Subpolare Wirbel (Subpolar Gyre/SPG)** im Nordatlantik ist ein Schlüsselfaktor für den Wärmetransport, die Klimastabilität und das ökologische Gleichgewicht der subpolaren und angrenzenden Regionen. Er reguliert insbesondere die Zirkulation von warmem und kaltem Wasser zwischen den subpolaren und subtropischen Regionen. Damit steuert der SPG den ozeanischen Wärmetransport und beeinflusst nachhaltig das Klima in Europa und Nordamerika. Veränderungen des SPG wirken sich deshalb unmittelbar auf Wetter, Klima und marine Ökosysteme aus – insbesondere im Nordatlantikraum, aber auch darüber hinaus.²⁸⁷

²⁸⁵ Vgl. dazu grundlegend: PIK (2025, Erdsystem); sowie ausführlich: Rahmstorf (2024, Tipping Point).

²⁸⁶ Vgl. dazu ausführlich: Böning et al. (2006, Subpolar Gyre): „The cyclonic circulation of the subpolar gyre in the North Atlantic represents an important part of the global thermohaline circulation (THC).“

²⁸⁷ In Teilen basierend auf KI-Analyse: Perplexity (2025, Subpolar Gyre).

Abb. 38: „Subpolarer Wirbel“ erzeugt wichtige ozeanische Konvektion



Quelle: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report)

Durch den fortschreitenden Prozess der arktischen Erwärmung, insbesondere aber durch das massive Abschmelzen großer Eismassen in Grönland und im arktischen Eismeer, verändern sich jedoch auch die **grundlegenden physikalischen Gegebenheiten** des *Subpolaren Wirbels*.

Die daraus resultierenden Folgen sind schwerwiegend, denn:

- ▶ Durch das Abschmelzen grönländischer Gletscher und polarer Eismassen entstehen große Mengen an **Süßwasser**, die nicht nur den Meeresspiegel erhöhen, sondern zugleich auch den Salzgehalt im „Irminger-Meer“ und anderen Meeresteilen spürbar „verwässern“.²⁸⁸

Eine Reduktion des Salzgehalts im Wasser wirkt jedoch unmittelbar auf die **thermohaline Dynamik** des *SPG* sowie der *AMOC* und beeinträchtigt deren elementare Wirkungsweise.

- ▶ Entsprechend bewirkt der stetige **Zustrom von salzarmem Schmelzwasser im Nordatlantik** einen schon heute deutlich messbaren Abschwächungseffekt des *Subpolaren Wirbels*.²⁸⁹

Diese zunehmend fragile Konstellation rund um den *Subpolaren Wirbel* hat für die Matrix der *Climate Tipping Points* eine **zentrale Bedeutung**, denn:

- ▶ Eine Veränderung der *SPG*-Dynamik birgt das Potential, den planetaren Strömungsverlauf – und somit auch das globale Klimasystem – entscheidend zu verändern!²⁹⁰
- ▶ Aus diesem Grund identifiziert die moderne Klimaforschung den *Subpolaren Wirbel* als eines der **besonders bedrohten Kippelemente des Weltklimas** – und dessen Abschwächung (sowie möglichen Kollaps) als eine der **derzeit wichtigsten Kippdynamiken**!²⁹¹

²⁸⁸ Vgl. dazu ausführlich: CCCA (2024, Kippunkte); Rahmstorf (2024, Tipping Point).

²⁸⁹ Vgl. dazu: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), (insbesondere S. 87).

²⁹⁰ Vgl. dazu ausführlich: CCCA (2024, Kippunkte); Rahmstorf (2024, Tipping Point).

²⁹¹ Vgl. in diesem Sinne etwa: Rahmstorf (2024, Tipping Point); sowie: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), (insbesondere S. 75-87).

Der mutmaßliche **Kipppunkt** des *Subpolaren Wirbels* liegt nach übereinstimmenden Einschätzungen nahe am derzeitigen Trend der globalen Erwärmung und könnte somit schon in wenigen Jahren ausgelöst werden:

- ▶ „Modellsimulationen deuten auf einen möglichen Kollaps bei etwa 1,8°C Klimaerwärmung (Bereich: 1,1 bis 3,8°C) innerhalb von etwa 10 Jahren hin.“²⁹²

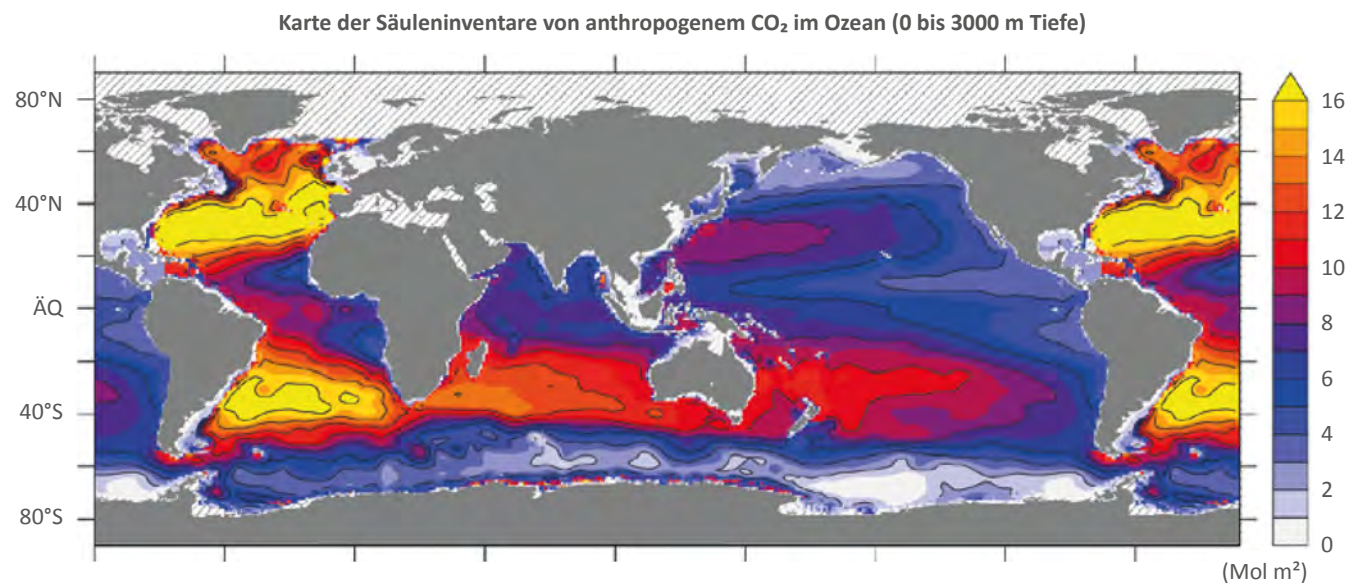
Zusätzlich problematisch ist dabei, dass im Nordatlantik **mehrere strukturelle Einflussfaktoren** der THZ zusammentreffen und sich dabei **möglicherweise gegenseitig verstärken**: So erhitzt sich speziell die Arktis erheblich schneller als andere globale Regionen, was den Prozess der arktischen Eisschmel-

ze und den fortlaufenden Eintrag von Süßwasser immer weiter beschleunigt und zudem auch – über den **rückläufigen Albedo-Effekt** – den generellen Prozess der Erderwärmung verstärkt.²⁹³

Gleichzeitig scheinen, als direkte Folge der THZ und deren globaler Strömungsmuster, umfangreiche Gebiete im nördlichen und nordwestlichen Atlantik besonders stark als *Treibhausgassenke* zu fungieren – mit einer auffallend **hohen Konzentration an gebundenem CO₂** selbst bis in große Meerestiefen (vgl. dazu Abb. 39).²⁹⁴

Vorerst ist noch nicht völlig klar, ob und inwiefern die Anreicherung von CO₂ die bereits laufende Abschwächung der Konvektion im Nordatlantik verändert oder sogar zusätzlich verstärkt. Sehr wahrscheinlich ist jedoch, dass sich beide Phänomene gegenseitig beeinflussen – aus Sicht der globalen Klimaveränderung allerdings wohl nicht zum Besseren.²⁹⁵

Abb. 39: Hohe CO₂-Konzentration im Nordwestatlantik bis in große Tiefen



Änderung des Säuleninventars ΔC_{ant} (1994-2007)

Quelle: DWD (2022, Kohlenstoffkreislauf)

²⁹² CCCA (2024, Kipppunkte); analog auch: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 78.

²⁹³ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 5.2.

²⁹⁴ Dazu erklärt DWD (2022, Kohlenstoffkreislauf), S. 29: „Es ist daher nicht überraschend, dass der Nordatlantik das größte Wassersäuleninventar von anthropogenem CO₂ im Weltozean aufweist. (...) So hat dieses im westlichen Becken des Nordatlantiks bereits die gesamte Wassersäule durchdrungen und Tiefen von mehr als 4000 m erreicht, so tief wie nirgends sonst im Weltmeer.“

²⁹⁵ Vgl. dazu die entsprechende Diskussion bei: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 85.

In Faktoren wie der Dynamik des „Subpolaren Wirbels“ zeigt sich das **Grundprinzip der multiplen Interdependenzen des globalen Klimageschehens** in Reinform: Diese spezielle Meereszirkulation prägt die seit einiger Zeit zu beobachtenden Anomalien rund um das *Labrador- und Irminger-Meer*. Als relativ kleines – und scheinbar unbedeutendes – Element des Erdsystems hat der *SPG* das Potential, mit seinem „Umkippen“ weitere kritische Folgewirkungen und **mögliche „Kippkaskaden“ in globalem Maßstab** auszulösen.

Kippdynamiken der AMOC

Inwiefern die Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren im Nordatlantik zusammenwirken und sich möglicherweise gegenseitig verstärken, ist nicht völlig klar. Dennoch warnen führende Klimaforscher vor einer strukturellen – und laufend zunehmenden – Instabilität der **Nordatlantischen Umwälzzirkulation (AMOC)**, die deshalb als **zentrales Kippelement** gilt.²⁹⁶

Aus diesem Grund wurde das AMOC-Phänomen auch auf der jüngsten *Global Tipping Points*-Konferenz der *Universität Exeter* (2025) ausgiebig erörtert – mit folgender Grundeinschätzung:

- ▶ „Neuere Forschung deutet darauf hin, dass dieses System aus Ozeanströmungen instabiler sein könnte als lange gedacht, und in den kommenden 100 Jahren eine massive Abschwächung bis hin zum Kollaps drohen könnte.“²⁹⁷

Speziell jüngere Simulationen, durchgeführt von einem niederländischen Forschungsteam auf einem Hochleistungscomputer, deuten auf ein im Vergleich zu bisherigen Annahmen möglicherweise sehr viel **schnelleres Umkippen** der AMOC:

- ▶ „We estimate a collapse of the AMOC to occur **around mid-century** under the current scenario of future emissions.“²⁹⁸

Die Ergebnisse dieser Simulation sind zwar derzeit in Fachkreisen noch umstritten, doch auch andere Forscher fanden in den letzten Jahren vermehrt Hinweise auf eine **beschleunigte Veränderung** der *thermohalinen Zirkulation* im Nordatlantik.²⁹⁹

Bereits 2018 lieferte eine Studie „*Stärkere Belege für Abschwächung des Golfstromsystems*“ – und bezog daraus eine sehr klare Einschätzung der AMOC-Dynamik:

- ▶ „Temperaturdaten von der Meeresoberfläche liefern neue Belege dafür, dass sich diese große Ozeanzirkulation seit Mitte des 20. Jahrhunderts um etwa **15 Prozent verlangsamt** hat.“³⁰⁰

Nach Ansicht vieler Experten belegt dieser Befund die „... Empfindlichkeit der Umwälzströmung gegenüber **Erwärmung und Süßwassereintrag** – etwas, das nun mit der vom Menschen verursachten Erwärmung und Beschleunigung der *Grönland-Schmelze* wieder geschieht.“³⁰¹



Die AMOC spielt eine wichtige Rolle für die Bewahrung eines relativ milden Klimas in West- und Nordeuropa.

Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken)



²⁹⁶ Vgl. dazu ausführlich: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), Zitat: S. 26.

²⁹⁷ Focus (2025, Atlantik-Strömung); unter Bezugnahme auf die *Global Tipping Points*-Konferenz 2025. Vgl. dazu ausführlich: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2025, Report).

²⁹⁸ Ditlevsen/Ditlevsen (2023, Collapse); (Hervorhebungen durch Verfasser). Mit entsprechender Berichterstattung dazu auch: FR (2024, Eiszeit).

²⁹⁹ Hinweise auf eine mögliche Beschleunigung der AMOC-Veränderung finden sich bereits bei: Rahmstorf et al. (2015, Exceptional); sowie ausführlich: Rahmstorf (2024, Tipping Point). Neuere und ebenfalls bestätigende Ergebnisse stammen etwa von: Drijfhout et al. (2025, Shutdown); vgl. dazu kommentierend auch: Spiegel (2025, AMOC).

³⁰⁰ PIK (2018, Abschwächung); (Hervorhebungen durch Verfasser); unter Bezug auf die Originalstudie von: Caesar et al. (2018, Fingerprint).

³⁰¹ PIK (2018, Abschwächung); (Hervorhebungen durch Verfasser).

Nicht zuletzt durch langjährige Forschungen des Klimaexperten *Stefan Rahmstorf*, seit 1996 tätig am *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)*, wurde das Bewusstsein für die enorme Bedeutung und potentielle Tragweite des AMOC-Phänomens deutlich geschärft:

- ▶ So verwies *Rahmstorf* (1996) bereits frühzeitig – und unter Rekurs auf ein Modell von *Stommel* (1961) – auf die grundsätzliche Möglichkeit einer AMOC-Abschwächung.³⁰²
- ▶ Seitdem war der *PIK*-Forscher an zahlreichen Studien zur Dynamik der AMOC beteiligt und vertiefte kontinuierlich entsprechende Problemanalysen und Risikoeinschätzungen.³⁰³

Als Ergebnis ausgedehnter Untersuchungen über einen längeren Zeitraum erklärt *Rahmstorf* (2023):

- ▶ „Die AMOC hat sich in den letzten hundert Jahren abgeschwächt [und] ist jetzt schwächer als je zuvor im letzten Jahrtausend.“³⁰⁴

Kipppunkt-Szenarien und mögliche Auswirkungen

Weitere Studien – wie zuletzt etwa aus dem Umfeld der *Universität Utrecht* (2024) – gehen auf Grundlage komplexer Simulationen sogar noch weiter und ermitteln darin erstmals auch einen **klar definierten Umkipppunkt** der AMOC; dieser könnte nach Überschreitung kritischer Grenzwerte schon innerhalb relativ kurzer Zeiträume (25 bis 40 Jahre) ausgelöst werden.³⁰⁵

Eine weiterführende Studie von *Drijfhout et al.* (2025) postuliert:

- ▶ „Auf diesen Kipppunkt würde spätestens in 50 bis 100 Jahren das Aus der Strömung folgen.“³⁰⁶



... the AMOC is on course to tipping ...

van Westen et al. (2024, Tipping Course)



Die Autoren der ursprünglichen Untersuchung erklären dazu:

- ▶ „... we find an **abrupt AMOC collapse**. (...) *The collapse is primarily a response due to internal feedbacks.*“³⁰⁷ (Vgl. dazu veranschaulichend Abb. 40).

Für dieses klare Resultat war unter anderem entscheidend, dass im Rahmen der Simulation auch **mögliche Verstärkungs- und Rückkopplungseffekte** mit Klimaphänomenen anderer Subsysteme explizit berücksichtigt wurden. Diese Modellierung erzeugt eine sehr dynamische Ereignissequenz, die – ganz im Sinne einer iterativen **Kippkaskade** – die globalen Effekte deutlich verstärkt und beschleunigt, mit eindeutigem Ergebnis:

- ▶ „Die Folgen des Zusammenbruchs **fallen stärker aus als in früheren Studien**, in denen Rückkopplungseffekte zwischen dem Klima und der Ausbreitung des Meereises häufig ignoriert wurden.“³⁰⁸

Auf Grundlage aktueller Modellrechnungen erklärt dazu AMOC-Experte *Stefan Rahmstorf* (2025):

- ▶ „Das Risiko eines Zusammenbruchs ist somit höher als von vielen Menschen bisher angenommen.“³⁰⁹

³⁰² Vgl. dazu ausführlich: *Rahmstorf* (1996, Circulation); sowie *Stommel* (1961, Convection).

³⁰³ Vgl. dazu stellvertretend: *Rahmstorf et al.* (2005, Hysteresis); *Rahmstorf et al.* (2015, Exceptional); *Rahmstorf* (2024, Tipping Point). Für weitere ausführliche Nachweise vgl.: *PIK* (2025, Publications).

³⁰⁴ *Rahmstorf* (2023, Atlantikzirkulation); analog auch: *PIK* (2021, Golfstrom-System); *Rahmstorf* (2024, Tipping Point).

³⁰⁵ Vgl. dazu: *Klimareporter* (2024, Kipppunkt); sowie die Originalstudie unter: *van Westen et al.* (2024, Tipping Course).

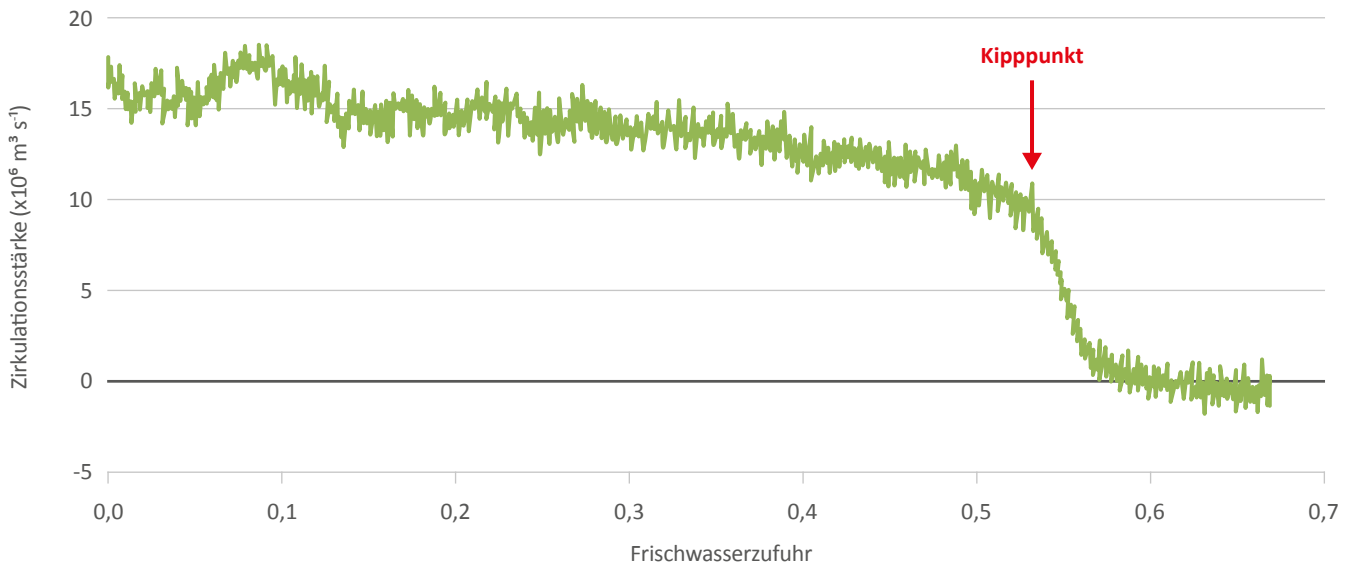
³⁰⁶ *Spiegel* (2025, AMOC); unter Bezugnahme auf die Studie von *Drijfhout et al.* (2025, Shutdown).

³⁰⁷ *van Westen et al.* (2024, Tipping Course); (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁰⁸ *Klimareporter* (2024, Kipppunkt); (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁰⁹ *Stefan Rahmstorf*, Leiter der Abteilung für Erdsystemanalyse, *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)*, zitiert nach: *ntv* (2025, Winter); (Hervorhebungen durch Verfasser). Vgl. analog: *Klimareporter* (2025, Atlantikströmung).

Abb. 40: Simulationsnachweis für abrupten Kollaps der AMOC („AMOC Tipping Point“)



Quelle: The Conversation (2024, Atlantic); unter Bezugnahme auf van Westen et al. (2024, Tipping Course)

Die Auswirkungen eines solchen Kollapses oder einer Umkehrung der AMOC für das Weltklima wären (gemäß zugrundeliegender Simulation) **äußerst schwerwiegend**:

- „In Nordamerika und besonders in Europa würde der Zusammenbruch der Strömung einen **enormen Temperatursturz** auslösen. Einige Gebiete in Nordeuropa würden sich mit einer Rate von **drei Grad pro Dekade** abkühlen.“³¹⁰

Die entsprechenden Modellsimulationen zeigen, wie massiv sich das Klima – mit einer Abkühlung bis hin zu deutlich zweistelligen Werten! – speziell in Mittel- und Nordeuropa verändern könnte, falls die AMOC tatsächlich kollabieren und zum Stillstand kommen würde.³¹¹ (Vgl. dazu Abb. 41, S. 82).



Forschende entdecken alarmierende Veränderungen im Golfstrom: ‚Eiszeit‘ für Europa möglich.

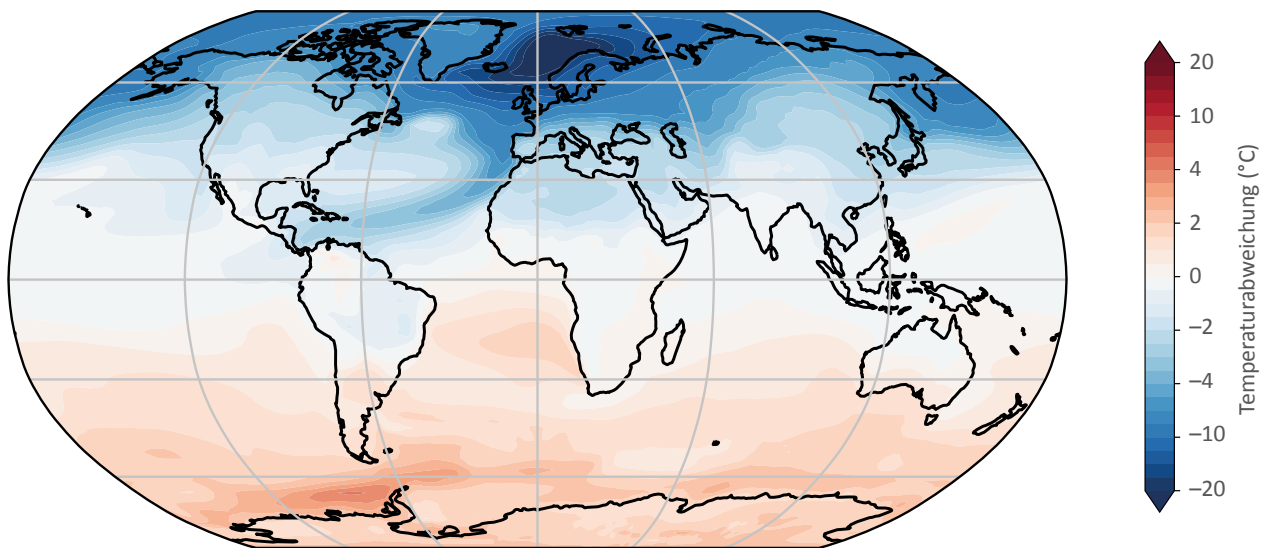
FR (2024, Eiszeit)



³¹⁰ Klimareporter (2024, Kipppunkt); (Hervorhebungen durch Verfasser). Vgl. dazu analog auch: The Conversation (2024, Atlantic): „We found that parts of Norway would experience temperature drops of more than 36 F (20 C).“

³¹¹ Vgl. dazu: Rahmstorf (2024, Tipping Point), S. 18; unter Bezugnahme auf entsprechende Simulationsrechnungen von van Westen et al. (2024, Tipping Course). Analog auch aktuelle Einschätzungen von Stefan Rahmstorf in: ntv (2025, Winter); Spiegel (2025, AMOC); sowie: Tagesschau (2025, Kipppunkt).

Abb. 41: Szenario einer massiven Abkühlung in Nordeuropa nach AMOC-Kollaps



Quelle: Rahmstorf (2024, Tipping Point); unter Bezugnahme auf Ergebnisse von van Westen et al. (2024, Tipping Course)

Neben einer **scharfen Abkühlung** in weiten Teilen Europas („*The European climate is significantly different after the AMOC collapse*“) hätte ein Umkippen der AMOC demnach aber auch, ganz im Sinne einer **multiplen Interdependenz** des globalen Klimasystems, massive Auswirkungen auf ein anderes zentrales Klimakippelement – den **Amazonas-Regenwald** –, was weitere schwerwiegende Klimakippkaskaden in Gang setzen oder beschleunigen könnte.³¹²

Damit wird sehr schnell klar, welche **enormen globalen Auswirkungen und Folgeeffekte** eine starke Verlangsamung, ein Stillstand oder gar eine Umkehrung der Atlantischen Umwälzzirkulation auf das gesamte Weltklima hätte – nicht zuletzt als Auslöser oder Verstärker weiterer kritischer Dynamiken und Kippkaskaden.

In diesem Sinne äußert sich auch eine zusammenfassende Analyse von *Umweltbundesamt* (2024):

- „*Studien und Modelle zeigen, dass ein vollständiges Erlahmen der AMOC zu erheblichen klimatischen Veränderungen führen könnte, einschließlich einer **Abkühlung des Nordatlantiks um 3 bis 8°C** und einer **Verschiebung des tropischen Regengürtels nach Süden**.*“³¹³

“*... up until now one could think that AMOC tipping was only a theoretical concept ...*

van Westen et al. (2024, Tipping Course)

³¹² Vgl. van Westen et al. (2024, Tipping Course): „*These AMOC-induced precipitation changes could severely disrupt the ecosystem of the Amazon rainforest.*“; (dort auch Text-Zitat). Vgl. dazu weiterführend auch: unten, Kap. 5.4.

³¹³ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 27; (Hervorhebungen durch Verfasser). Analog auch: ntv (2025, Winter), unter Bezugnahme auf eine neue Analyse von: Drijfhout et al. (2025, Shutdown).

Aktuelle Risikoeinschätzungen – Subpolarer Wirbel im Fokus

Derzeit ist noch umstritten, bei welchem Niveau der globalen Erwärmung ein AMOC-Kippunkt tatsächlich ausgelöst würde und in welchem Zeitraum – aber auch mit welchen Konsequenzen – sich das Szenario eines AMOC-Kollapses materialisieren könnte.³¹⁴

Teilweise losgelöst davon steht jedoch insbesondere der Subpolare Wirbel (Subpolar Gyre; SPG) im Fokus aktueller Klimanalysen.³¹⁵ Der SPG ist zwar eng verknüpft mit der AMOC und wirkt als einer der wichtigsten Treiber der gesamten Nordatlantischen Umwälzzirkulation – dennoch rechtfertigt seine zentrale Rolle als gewaltige „Wasserpumpe“ und „Meereskraftwerk im Nordatlantik“ eine eigenständige Analyse. Dies gilt prinzipiell auch bei der **Abschätzung potentieller Kippdynamiken und Kippunkte** – und folglich auch für die entsprechenden zeitlichen Abläufe und Ereignisrisiken:

- ▶ „Although SPG changes are apparently linked to the AMOC, the **SPG collapse can occur much faster than AMOC collapse**, on the timescale of only a few decades.“³¹⁶

Mit Blick auf die thermische Sensitivität und einen möglichen Kippunkt des Subpolaren Wirbels stufen aktuelle Analysen bereits einen Temperaturanstieg von **rund 1,8°C** (Bandbreite: 1,1 bis 3,8°) gegenüber dem vorindustriellen Niveau als kritisch ein – was angesichts des aktuellen Trends der Erderwärmung gefährlich nahe wirkt.³¹⁷

- ▶ Schon jetzt scheint die Zirkulation im Subpolaren Wirbel **akut gefährdet** und könnte innerhalb weniger Jahre kippen – mit äußerst schwerwiegenden Folgen.³¹⁸

Mit Blick auf die gesamte Atlantische Umwälzzirkulation gilt derzeit hingegen noch eine **etwas gemäßigtere Einschätzung**, die allerdings durch neuere Studien vermehrt herausgefordert wird:

- ▶ „Aktuell wird davon ausgegangen, dass die AMOC bei einer globalen Temperatur [gemeint ist: Temperaturanstieg] von etwa 4°C (1,4-8°C) aus dem Gleichgewicht gebracht werden kann und ihren Kippunkt erreicht.“³¹⁹

Nach Erreichen oder Überschreiten dieses Kippunktes würden sich, gemäß dieser Einschätzung, entsprechende Veränderungen „... über einen Zeitraum von rund 50 Jahren (15 bis 300 Jahren) einstellen.“³²⁰

Der umfassende Sachstandsbericht von IPCC (2023) bestätigt derzeit noch dieses Gesamtbild und gibt dazu folgende (diplomatisch formulierte) Einschätzung – jedoch mit durchaus dringlichem Unterton:

- ▶ „There is medium confidence that the Atlantic Meridional Overturning Circulation will not collapse abruptly before 2100, but if it were to occur, it would **very likely cause abrupt shifts in regional weather patterns, and large impacts on ecosystems and human activities.**“³²¹



The AMOC is the key global mediator of tipping point interactions ...

University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report)



³¹⁴ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, vorherige Abschnitte.

³¹⁵ Vgl. dazu bereits oben: vorhergehende Ausführungen.

³¹⁶ University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 87; (Hervorhebungen durch Verfasser).

³¹⁷ Vgl. dazu etwa: CCCA (2024, Kippunkte); mit weiteren Nachweisen. Analog dazu auch: Rahmstorf (2024, Tipping Points); PIK (2025, Erdsystem). Vgl. dazu ausführlich bereits: oben („Kritische Dynamik im Labrador- und Irminger-Meer“).

³¹⁸ Zu den möglichen Konsequenzen vgl. insbesondere: PIK (2025, Erdsystem): „Zu den Folgen zählen eine regionale Abkühlung im Nordatlantik um circa 2-3°C und möglicherweise globale Abkühlung um 0,5°C (...). Außerdem rechnet man mit einer Verschiebung des Jetstreams in Richtung Norden, Wetterextremen in Europa sowie einer Verschiebung der intertropischen Konvergenzzone nach Süden.“

³¹⁹ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 27. Zu den kritischeren Einzelstudien vgl. insbesondere: Ditlevsen/Ditlevsen (2023, Collapse); sowie: van Westen et al. (2024, Tipping Course).

³²⁰ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 27.

³²¹ IPCC (2023, Summary), (Summary for Policymakers), S. 17-18; (Hervorhebungen durch Verfasser).

Vor diesem Hintergrund wird klar, dass auch beim AMOC-Phänomen im Hinblick auf dessen mögliche Kippdynamik mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits ein **sehr kritisches Szenario** abläuft – mit enormer Tragweite für das gesamte Erdsystem. Im Sinne der vorliegenden Analyse resultiert daraus eine **hohe Dringlichkeit** – bei ebenfalls sehr **hoher systemischer Relevanz**. Allerdings sind derzeit weder der genaue Ablauf noch die zeitliche Dimension möglicher AMOC-Szenarien verlässlich einzuschätzen.³²²

Zusammenfassend folgt daraus:

Neben dem beschleunigten Abschmelzen der polaren Eiskappen gilt inzwischen auch eine adverse Veränderung der *Atlantischen Umwälzströmung* – insbesondere jedoch beim *Subpolaren Wirbel* – als **zentrales Kippelement** im globalen Klimasystem. Mögliche Risikoszenarien richten sich auf eine deutliche **Abschwächung**, einen drohenden **Stillstand** oder sogar eine mittelfristige **Umkehrung** dieser wichtigen globalen Strömungssysteme.³²³

Neuere Untersuchungen geben vermehrt Anlass, nicht nur den hypothetischen **Zeithorizont** für eine drohende AMOC-Veränderung zu verkürzen, sondern auch die daraus resultierenden unmittelbaren **Folgewirkungen** – aber auch mögliche indirekte Effekte und **systemische Interdependenzen** – auf einer globalen Risikoskala **deutlich höher einzustufen**.³²⁴

Mit Blick auf die AMOC erklären die Klimawissenschaftler des *Alfred-Wegener-Instituts* (2025):

- ▶ „Jüngste Studien wecken die Besorgnis, dass sich das System einem Kippunkt nähert, der weitreichende Auswirkungen auf Wettermuster, Meeresspiegel, marine Ökosysteme und sozioökonomische Systeme haben könnte.“³²⁵

Deutlich dringender als bislang klingt auch die jüngste Einschätzung des Klimaforschers und AMOC-Experten *Stefan Rahmstorf*: Dieser sieht auf Grundlage neuer Studienergebnisse **immer mehr Indizien** für einen relativ zeitnahen – zwar langsamen, aber dennoch irreversiblen – Übergang in den Prozess einer **AMOC-Abschwächung**. Dies führt zu folgender Einschätzung:

- ▶ „Die Umwälzzirkulation im Nordatlantik verlangsamt sich bis zum Jahr 2100 stark und bricht danach in allen Szenarien mit hohen Emissionen und sogar in einigen Szenarien mit mittleren und niedrigen Emissionen zusammen.“³²⁶
- ▶ „Ein Kollaps der Meeresströmung ist viel wahrscheinlicher als bisher angenommen. Zwar erst nach 2100, aber **der Prozess beginnt wesentlich früher**.“ Und weiter:
- ▶ „Also eigentlich ist der **Kippunkt schon in vielen der Modelle in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten erreicht**.“³²⁷

³²² Dazu erklären die Meeres- und Klimaforscher von GEOMAR (2022, Strömungssystem): „Da bereits ein einziger falsch eingestellter Parameter die Darstellung beeinträchtigen kann, galten die Ergebnisse von AMOC-Simulationen in der Vergangenheit als unsicher.“ Generell nimmt GEOMAR bei dieser Diskussion eine zurückhaltendere Position ein, da für AMOC-Veränderungen auch natürliche Ursachen nachweisbar sind. Auch Kilbourne et al. (2022, Uncertain) geben zu bedenken, dass der Sachstand zur AMOC-Dynamik weiterhin nicht eindeutig sei.

³²³ Vgl. dazu ausführlich: PIK (2018, Abschwächung); PIK (2021, Golfstrom-System); Rahmstorf (2023, Atlantikzirkulation). AMOC-Experte *Rahmstorf* erklärt: „... there is overwhelming evidence for a long-term weakening of the AMOC since the early or mid-twentieth century.“; Rahmstorf (2024, Tipping Point), S. 24.

³²⁴ In diesem Sinne auch: Focus (2025, Atlantik-Strömung): „Neuere Forschung deutet darauf hin, dass dieses System aus Ozeanströmungen instabiler sein könnte als lange gedacht, und in den kommenden 100 Jahren eine massive Abschwächung bis hin zum Kollaps drohen könnte.“ Vgl. dazu insbesondere die neueren Arbeiten von: Ditlevsen/Ditlevsen (2023, Collapse); sowie: van Westen et al. (2024, Tipping Course). Für einen kurzen Überblick vgl. etwa: Klimareporter (2024, Kippunkt). Ausführlich dazu auch der neueste Bericht von: University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report).

³²⁵ AWI (2025, AMOC). Vgl. zu derartigen Szenarien überblickartig auch: Focus (2025, Atlantikstrom).

³²⁶ *Stefan Rahmstorf*, Abteilungsleiter für Erdsystemanalyse, *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung* (PIK); zitiert nach: ntv (2025, Winter).

³²⁷ *Stefan Rahmstorf* (PIK); zitiert nach: Tagesschau (2025, Kippunkt). Analog auch: ntv (2025, Winter); Spiegel (2025, AMOC).



Das Risiko eines Zusammenbruchs ist somit höher als von vielen Menschen bisher angenommen.

Stefan Rahmstorf, Leiter Erdsystemanalyse,
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 2025



Schlussfolgerungen und Vorkehrungen

Auch wenn für das AMOC-Phänomen eine präzise Bestimmung möglicher Kipprisiken derzeit kaum möglich (oder zumindest umstritten) ist, sollten zwei klare **Schlussfolgerungen** gezogen werden:

1. Beobachtung möglicher Frühindikatoren und „Fingerprints“

Studien zur AMOC-Dynamik verweisen immer wieder auf die Bedeutung möglicher **Frühindikatoren** und „Fingerprints“, die einen möglichen Kollaps der Strömung ankündigen oder bestätigen könnten. Von besonderer Bedeutung sind dabei spezielle **Temperaturanomalien** im Nordatlantik („cold blob“) sowie an der Ostküste der USA (wo sich das Meer überproportional erwärmt).³²⁸

- ▶ Beide Anomalien können heute mit Hilfe von Satelliten laufend beobachtet und „gemessen“ werden; ihre Ausweitung würde die These einer AMOC-Abschwächung sowie eines möglichen Zusammenbruchs des *Subpolaren Wirbels* bestätigen.³²⁹

2. Analyse möglicher Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekte

Das AMOC-Phänomen hat **multiple Beziehungen** zu anderen wichtigen Subsystemen und Kippelementen des Erdsystems. Dazu zählen insbesondere die polare **Eisschmelze**, aber auch die zunehmende ozeanische **Erwärmung** sowie die gleichzeitig auftretende Kälteanomalie im Nordatlantik („cold blob“). Eine besonders starke Interdependenz besteht mit den beiden erstgenannten Phänomenen, die Aufbau und Dynamik der AMOC massiv beeinflussen:

- ▶ Mit progressiv zunehmendem **Abschmelzen** der polaren Eismassen und gleichzeitigem Anstieg der **Erderwärmung** wird ein „Umkippen“ der AMOC immer wahrscheinlicher.³³⁰
- ▶ Negativ auf die AMOC wirkt auch die massive **ozeanische Erwärmung**, da sie die thermische Dynamik der Meeresströmungen sowie des *SPG* unmittelbar verändert und beeinträchtigt.³³¹
- ▶ Umgekehrt hätten eine Abschwächung oder gar ein Kollaps der AMOC – eingeleitet oder verstärkt durch einen Zusammenbruch des *Subpolaren Wirbels* – massive Rückwirkungen auf das **globale Klima** und nachgelagerte Teile des Erdsystems.³³²

Denkbar sind darüber hinaus noch weitere Folgewirkungen, darunter eine Verschiebung globaler **Regenzonen**, ein „Austrocknen“ des **Amazonasbeckens** oder eine Beeinträchtigung atmosphärischer **Höhenströmungen** (*Jetstreams*) – mit jeweils weiteren adversen Konsequenzen und Effekten zweiter und dritter Ordnung.³³³

³²⁸ Vgl. dazu etwa: PIK (2018, Abschwächung); Caesar et al. (2018, Fingerprint); Rahmstorf (2024, Tipping Point). Der „cold blob“ ist eine ausgedehnte Region im Nordatlantik mit ungewöhnlich tiefen Meerestemperaturen, der mutmaßlich als Folge einer Abschwächung der AMOC resultiert; vgl. dazu erstmals: Caesar et al. (2018, Fingerprint).

³²⁹ Diese Annahme basiert auf einer Vielzahl von Simulationen mit historischen Vergleichsdaten; vgl. dazu; Rahmstorf (2024, Tipping Point). Beide Anomalien dienen somit in der AMOC-Diskussion als „smoking gun“. Auch WMO (2024, Update), S. 5 erklärt dazu: „The negative anomalies are consistent with the weakening of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) since 2005.“

³³⁰ Dies hat mit der Veränderung des Salzgehalts im Atlantik zu tun; vgl. dazu bereits: oben, Kap. 5.2.

³³¹ Vgl. dazu ausführlich: unten, Kap. 5.5.

³³² Vgl. dazu: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 27: „Studien und Modelle zeigen, dass ein vollständiges Erlahmen der AMOC zu erheblichen klimatischen Veränderungen führen könnte, einschließlich einer Abkühlung des Nordatlantiks um 3 bis 8°C und einer Verschiebung des tropischen Regengürtels nach Süden.“ Ergänzend: PIK (2025, Erdsystem): „Dies kann gravierende Auswirkungen haben auf Temperatur und Niederschlagsverteilungen – inklusive einer Erwärmung der südlichen Hemisphäre, einer Verschiebung der Intertropischen Konvergenzzone nach Süden, Monsunabschwächungen in Afrika und Asien und einer Verstärkung in der Südhemisphäre, was zu einer Austrocknung im Sahel und in Teilen des Amazonas führen kann.“

³³³ Vgl. dazu überblickartig: PIK (2025, Erdsystem).

Vor diesem Hintergrund sind sowohl eine enge Beobachtung geeigneter **Frühindikatoren** als auch eine – zumindest theoretische – Analyse möglicher **Wirkungsverstärker** und **Rückkopplungen** aus anderen Bereichen des Erdsystems erforderlich, um beim AMOC-Phänomen auch auf mögliche *Worst-Case-Szenarien* vorbereitet zu sein.³³⁴

Direkte und indirekte Interdependenzen mit anderen Kippelementen und Kippdynamiken:

Stabilisierende Auswirkung einer Abschwächung der AMOC auf **Grönland-Eis** (▷ Stabilisierung).

Moderate Auswirkung auf **Amazonas-Regenwald** (▷ Veränderung lokaler Klimazonen).

Generell: Abschwächung/Kollaps der AMOC würde grundlegende **planetare Strömungen** (Ozeane, Windsysteme) massiv beeinflussen und die **Klima- und Wetterverhältnisse** insbesondere in Nordamerika und Europa signifikant verändern (▷ Abkühlung).

Insgesamt: Sowohl positive als auch negative Rückkopplung der AMOC durch Eisschmelze von Grönland-Eisschild und (West-)Antarktischem Eisschild.

5.4 Tropische Regenwälder und Amazonas-Ökosystem

Von besonderer Bedeutung für das globale Klimasystem sind ausgedehnte Waldgebiete, darunter speziell die großen **tropischen Regenwälder** in Zentralafrika, Südostasien und Lateinamerika.³³⁵ Wälder und andere Pflanzen entziehen der Atmosphäre CO₂ in enormem Umfang und wirken dadurch regu-

lierend auf den globalen Treibhauseffekt (der primär aus dem menschengemachten Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase resultiert). Vor allem die tropischen Regenwälder reichern dabei große Mengen CO₂ an und wirken so – zumindest im Normalfall – als bedeutende planetarische **Kohlenstoffsenken**.³³⁶

Kohlenstoffsenken sind natürliche oder technische Systeme, die Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre aufnehmen und langfristig speichern. Zu den wichtigsten natürlichen Senken zählen Wälder, Meeralgen, Böden, Moore sowie Ozeane, die jeweils durch biologische und chemische Prozesse atmosphärisches CO₂ binden. Für die Stabilisierung des globalen Klimas sind großskalige Kohlenstoffsenken von zentraler Bedeutung.

Abb. 42 verdeutlicht die globale Verteilung tropischer Regenwälder und deren regionale Konzentration vor allem in subtropischen und äquatorialen Gebieten.

Normalerweise verfügen tropische Regenwälder über optimale Vegetationsbedingungen: hohe Luftfeuchtigkeit, viel Wärme und intensive Sonneneinstrahlung. Diese Konstellation ermöglicht reiches Pflanzenwachstum, was durch umfangreiche Photosynthese enormes Potential für die **laufende CO₂-Entnahme und -Umwandlung** aus der Atmosphäre schafft. Gleichzeitig geben Regenwälder durch Verdunstung wieder Feuchtigkeit an die Luft ab und erzeugen so einen **eigenständigen Klimakreislauf**, der auch andere Regionen direkt oder indirekt beeinflusst.³³⁷

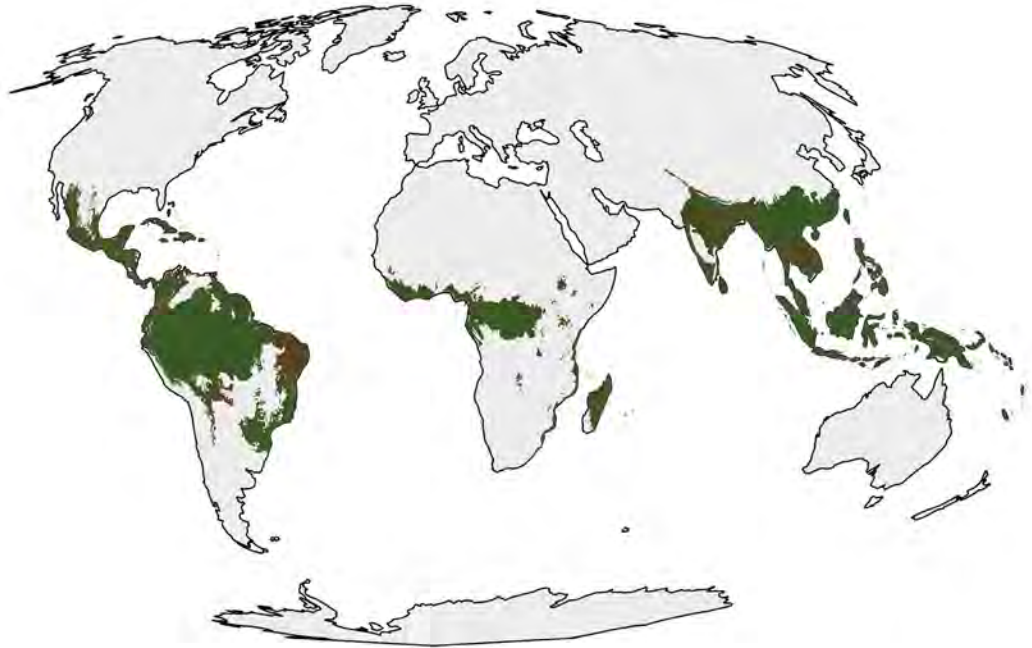
³³⁴ In diesem Sinne etwa: MET Office (2024, Circulation). Die AMOC-Studie von Caesar et al. (2018, Fingerprint) liefert dazu bereits wichtige Indizien, die im Sinne eines Frühwarnsystems genutzt werden können. Vgl. dazu auch: Focus (2025, Atlantik-Strömung); demnach hat die britische Regierung über ihre Forschungsförderagentur ARIA „... gerade ein Forschungsprogramm gestartet, um ein Frühwarnsystem für den befürchteten Kollaps (...) des sogenannten Subpolarwirbels südlich von Grönland – einem Teilsystem der AMOC – zu entwickeln.“

³³⁵ Hierbei handelt es sich insbesondere um das Amazonasbecken, das Kongobecken sowie ausgedehnte Waldgebiete in Südostasien (Borneo, Malaysia, Indonesien, Philippinen).

³³⁶ Als „Senken“ werden natürliche oder künstliche Reservoirs bezeichnet, die CO₂ und andere Treibhausgase aufnehmen und binden. Zum Begriff der Kohlenstoffsenken vgl. bereits: oben, Kap. 3.2.3.; World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf). Zu den Abweichungen zum Normalfall vgl.: unten, nachfolgende Abschnitte.

³³⁷ Vgl. dazu insbesondere die Ausführungen zum Amazonas-Regenwald: unten; nachfolgender Abschnitt. Überblickartig dazu auch: WWF (2007, Amazonas).

Abb. 42: Globale Verteilung tropischer Regenwälder



Quelle: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report)

Diese von der Natur über Jahrtausende fein ausbalancierten Abläufe werden jedoch als Folge der weltweiten Klimaveränderungen **zunehmend instabil**:

- ▶ Sinkende Niederschläge, partielle Austrocknung, verstärktes Extremwetter oder akuter Schädlingsbefall gefährden den natürlichen Kreislauf in vielen walddreichen Regionen.³³⁸

Hinzu kommt der **Faktor Mensch**, der immer rücksichtsloser in waldbasierte Ökosysteme eingreift: So finden in vielen walddreichen Regionen großflächige **Abholzungen** (Nutzholzgewinnung), **Brandrodungen** (Agrarlandgewinnung) oder andere invasive **Eingriffe** statt (darunter *Straßenbau, Siedlungen* oder *illegaler Bergbau*), die den Waldbestand massiv schädigen.³³⁹

Durch die Summe dieser Interventionen sind in den letzten Jahrzehnten bereits große Teile der tropischen Regenwälder verschwunden – oftmals unwiederbringlich:

- ▶ „2023 wurden 3,7 Millionen Hektar tropischer Regenwald verloren. Das entspricht in etwa der Fläche von Baden-Württemberg und dem Saarland zusammen und einer rasanten Entwaldungsquote von fast 10 Fußballfeldern pro Minute.“³⁴⁰

Wie neuere Daten zeigen, liegt der weltweite Verlust der globalen tropischen Regenwaldfläche im Jahr 2024 allerdings bereits bei über 6,7 Mio. Hektar – und damit um **mehr als 80% höher** als im Vorjahr!³⁴¹ (Vgl. dazu auch die Darstellung in Abb. 43, S. 88).

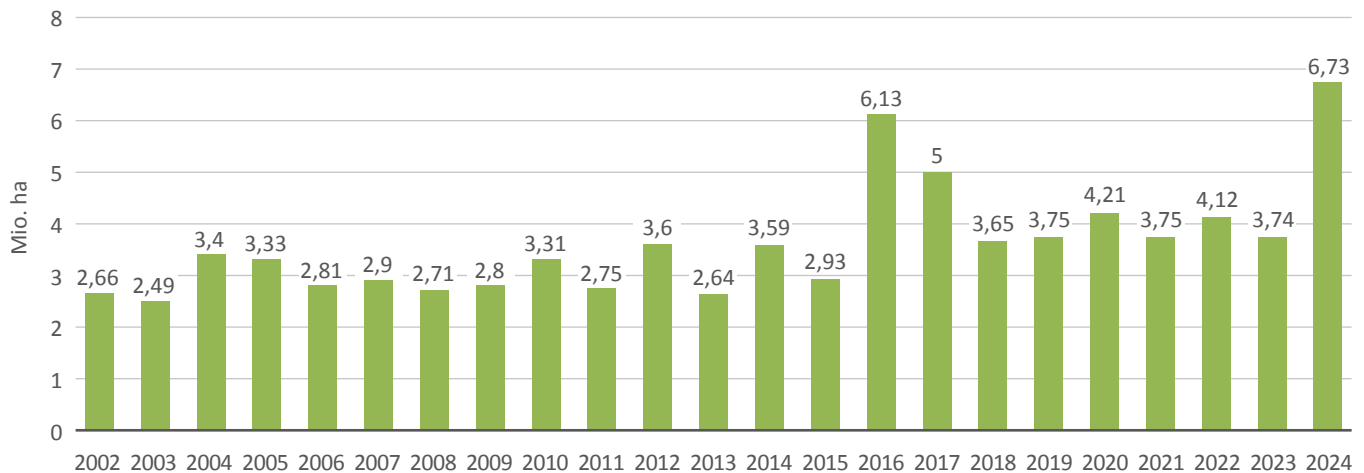
³³⁸ Viele dieser Aspekte hängen intrinsisch zusammen: Extremwetterereignisse (wie etwa schwere Tropenstürme oder Unwetter mit Blitzeinschlag und nachfolgendem Waldbrand) können den Waldbestand schädigen, werden aber ihrerseits durch die globale Erwärmung zumindest häufiger und stärker; Schädlingsbefall wird oftmals durch vom Klimawandel verursachte Trockenheit ausgelöst.

³³⁹ Dazu erklärt die Umweltschutzstiftung Oro Verde (2025, Regenwald): „Jedes Jahr gehen riesige Regenwaldflächen durch verschiedene Faktoren verloren. (...) Der Wald wird für Umwandlung in landwirtschaftliche Flächen, Viehhaltung, Infrastrukturprojekte oder für die Gewinnung von Bodenschätzen abgeholzt. Häufig geschieht dies auch illegal und sogar in geschützten Waldgebieten.“

³⁴⁰ Oro Verde (2025, Regenwald).

³⁴¹ Vgl. dazu: Statista (2025, Regenwaldfläche); World Resources Institute (2025, Forest Loss). Vgl. dazu grundsätzlich auch den Jahresbericht *Forest Resources Assessment 2020* von: UN-FAO (2020, Forest).

Abb. 43: Verlust der globalen tropischen Regenwaldfläche (2002-2024)



Quelle: Statista (2025, Regenwaldfläche)

Allein in Brasilien wurden im Jahr 2024 rund **2,82 Mio. Hektar Wald** vernichtet, etwa die **zweieinhalbfache Fläche** gegenüber 2023! Der Großteil dieser Verluste geht inzwischen auf **Feuer** zurück, die – auch als Folge zunehmender Trockenheit in der Region – inzwischen mehr und mehr um sich greifen und dabei immer größere Gebiete erfassen.³⁴²

- Dieser **zusätzliche Methan-Ausstoß** verschärft, als weitere Rückkopplung, den bereits bestehenden „Treibhauseffekt“ der Erderwärmung – mit unmittelbarer Relevanz auch für die Amazonas-Region.

Hinzu kommt noch eine weitere Problematik, die aus der langfristigen Transformation von zuvor gerodeter Waldsubstanz in Agrarflächen resultiert: Werden auf diesen Flächen später nicht nur (wie häufig der Fall) Sojabohnen angebaut, sondern überwiegend Nutztiere gehalten (insbesondere Rinder), so entsteht daraus ein **mehrfach negativer Effekt!**

- In diesem neuen „Teufelskreis“, der in der Amazonas-Region bereits eine große Rolle spielt, geht nicht nur **wichtige Biomasse zur Absorption von CO₂ verloren**, sondern gleichzeitig wird auch noch in großem Umfang **klimaschädliches Methan „produziert“**.³⁴³

Die anhaltenden Eingriffe des Menschen, verstärkt durch adverse Einflüsse des Klimawandels, führen zu einer **schweren Schädigung** der tropischen Regenwälder – sowohl in ihrer **Substanz** als auch hinsichtlich ihrer **Resilienz** und potentiellen **Regenerationsfähigkeit**. Dieser Aspekt ist im Rahmen der vorliegenden Analyse von zentraler Bedeutung, denn die tropischen Regenwälder spielen für das globale Klimasystem eine entscheidende Rolle:

- „Besonders im Fokus steht dabei der **Amazonas-Regenwald** – als prominentes Beispiel eines Kippelements, das unter dem gleichzeitigen Druck von Erderwärmung, Abholzung und Landnutzungsänderungen steht.“³⁴⁴

³⁴² Vgl. dazu (sowie zu den genannten Daten) ausführlich: World Resources Institute (2025, Forest Loss); überblickartig auch: ZDF heute (2025, Waldbrände).

³⁴³ Vgl. dazu etwa: WWF (2022, Amazon), S. 8: „Currently much of the pressure is associated with cattle ranching expansion for beef production ...“; zur Methan-Problematik der Viehzucht vgl. ausführlich bereits: oben, Kap. 3.1.2. Ein wichtiger Treiber dieser Dynamik ist der zunehmende Wohlstand in Asien (insbesondere China), der zu einem rapide steigenden Fleischkonsum und entsprechender Nachfrage im Ausland führt; vgl. dazu überblickartig etwa: ntv (2021, Regenwald).

³⁴⁴ PIK (2025, Wunderling); (Hervorhebungen durch Verfasser).

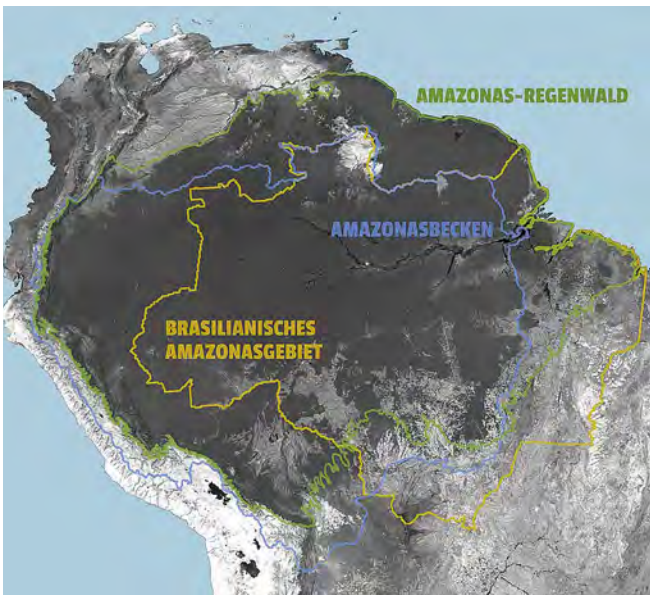


Der Amazonas-Regenwald bedeckt den größten Teil des südamerikanischen Amazonasbeckens und erstreckt sich bis nach Peru, Kolumbien, Bolivien, Ecuador, Französisch-Guayana, Guyana, Surinam und Venezuela. Der größte Teil liegt jedoch in Brasilien.

Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald)



Abb. 44: Geographische Dimension des Amazonas-Regenwalds



Quelle: Oro Verde (2025, Regenwald)

Wie Abb. 44 verdeutlicht, hat der Amazonas-Regenwald eine enorme Ausdehnung, die auch über Ländergrenzen hinweggeht und den **gesamten südamerikanischen Subkontinent** entscheidend prägt.

Zur weltweiten Bedeutung sowie zur aktuellen Problematik der Amazonas-Region erklärt in einem kurzen Überblick das *Joint Research Center* der EU (2021): „The Amazon forest is the largest tropical rainforest in the world, which houses about 10% of the Earth’s biodiversity and 16% of the world’s total river discharge into the oceans. **However, the Amazon forest has already lost up to 20% of its original area since the 1970s.**“³⁴⁵

Die Amazonas-Region als elementarer Stellhebel des Erdsystems

Der Amazonas-Regenwald (sowie das gesamte Ökosystem in Amazonien) zählt zu den wichtigsten Naturregionen der Welt und hat für das gesamte Erdsystem – insbesondere aber für die Funktionsweise des weltweiten Klimas – eine sehr zentrale und zugleich **äußerst tiefgreifende Rolle**:

- Im Amazonas-Gebiet finden sich rund **10% der bekannten Spezies**, darunter rund 400 Mrd. Bäume und 16.000 unterschiedliche Baumarten; damit leistet diese Region einen wertvollen Beitrag zur **Biodiversität**.³⁴⁶
- Der Amazonas-Regenwald dient zudem als **wichtige globale Kohlenstoffsenke** und speichert in seiner Biomasse 150 bis 200 Gigatonnen Kohlenstoff (rund 10% der weltweit in Vegetation gebundenen Menge) – und äquivalent zum weltweiten CO₂-Ausstoß von 15 bis 20 Jahren.³⁴⁷

³⁴⁵ EU-JRC (2021, Deforestation); (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁴⁶ Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald); [Autoren: *Conor Purcell, Michael Keary*].

³⁴⁷ Vergleichbarkeit nach entsprechender Umrechnung; vgl. dazu ausführlich: Flores et al. (2024, Amazon): „The Amazon forest holds more than 10% of Earth’s terrestrial biodiversity, stores an amount of carbon equivalent to 15-20 years of global CO₂ emissions (150-200 Pg C) ...“

- Der Amazonas-Baumbestand steht für rund **15% der weltweiten Photosyntheseleistung**; er absorbiert dadurch jährlich etwa 2 Mrd. Tonnen CO₂ und neutralisiert so rund 5% der globalen CO₂-Emissionen.³⁴⁸
- Das Amazonas-Flusssystem durchdringt eine riesige Region und transportiert im Schnitt jede Sekunde mehr als 200.000 Kubikmeter Wasser in den Atlantik. Diese Wassermenge (7 bis 8 Bio. Tonnen pro Jahr!) entspricht **15 bis 20% des weltweiten Süßwasserstroms** in die Meere.³⁴⁹
- Durch großvolumige **Verdunstung** erzeugt die Amazonas-Vegetation enorme Mengen an Feuchtigkeit, die als „*fliegender Fluss*“ bis in weit entfernte Regionen gelangen und deren Erhalt sichern. Die Kapazität des „*fliegenden Flusses*“, der so wichtige klimatische Bedingungen in ganz Lateinamerika beeinflusst, wird auf täglich bis zu 20 Mrd. Tonnen Wasser(dampf) veranschlagt.³⁵⁰

Zum letztgenannten Punkt, der für das gesamte Klimasystem des Planeten große Bedeutung hat und ein zentraler Faktor für die Einstufung des Amazonas-Regenwalds als wichtiges Kippelement ist, erklärt explizit auch das *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung* (2024):

- ▶ „Die Feuchtigkeit, die über die sogenannten ‚fliegenden Flüsse‘ des Amazonas transportiert wird, ist ein **wesentlicher Bestandteil des südamerikanischen Monsuns** und somit **essentiell für Regen in einem Großteil des Kontinents**.“³⁵¹

„Etwa 50-80% der Feuchtigkeit, die im Amazonasgebiet als Regen fällt, wird durch **Evapotranspiration** wiederverwertet, was die entscheidende Rolle dieses Ökosystems bei der Aufrechterhaltung seiner eigenen Wasserversorgung und darüber hinaus zeigt.“³⁵²

Abb. 45 und 46 verdeutlichen die grundlegende Wirkungsweise sowie die überregionale Bedeutung dieser zentralen Feuchtigkeitsverteilung aus dem Amazonas-Regenwald.



The Amazon forest is a complex system of interconnected species, ecosystems and human cultures that contributes to the well-being of people globally.

Flores et al. (2024, Amazon)



Massive Transformation des Amazonas-Ökosystems – mit negativer Klimabilanz

Allerdings ist der Amazonas-Regenwald – wie viele andere Teile des Erdsystems auch – in den letzten Jahren **zunehmenden und teilweise massiven Belastungen** ausgesetzt. Einzelne der oben angeführten Angaben und Berechnungen, die wohl eher früheren „Normalbedingungen“ entsprechen, dürften deshalb kaum mehr zutreffend sein, denn:

- ▶ Es wird geschätzt, dass inzwischen **bereits knapp 20%** des früheren Amazonas-Regenwalds verschwunden sind – durch Abholzung, Brandrodung, Sturmschäden oder Waldbrände.³⁵³
- ▶ Gleichzeitig wirkt sich auch die **globale Erwärmung** bereits erkennbar negativ auf das Amazonas-Ökosystem aus – in Form zunehmender **Austrocknung** und entsprechender Schädigung der biologischen Substanz.³⁵⁴

³⁴⁸ Vgl. zu diesen Angaben: WWF (2022, Amazon), S. 11; sowie: Fund The Planet (2023, Amazonas-Regenwald).

³⁴⁹ Vgl. zu diesen Angaben: WWF (2007, Amazonas); sowie: Spektrum (2011, Amazonas). Analog auch: EU-JRC (2021, Deforestation).

³⁵⁰ Vgl. dazu: Oro Verde (2025, Regenwald); PIK (2024, Amazonas-Regenwald). [Genereller Hinweis: Die Aktualität der oben wiedergegebenen Zahlen ist nicht zweifelsfrei gesichert; diese dürften oftmals einem früheren „Normalzustand“ entsprechen und könnten in der aktuellen Realität deutlich hiervon abweichen.]

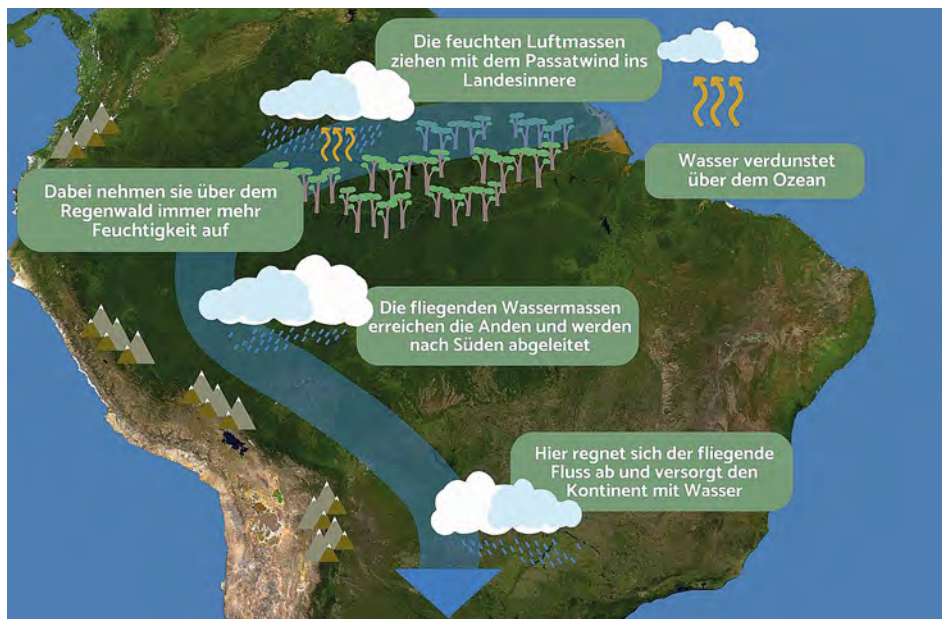
³⁵¹ PIK (2024, Amazonas-Regenwald); (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁵² Fund The Planet (2023, Amazonas-Regenwald). Als *Evapotranspiration* wird der Prozess der laufenden Verdunstung und Abgabe von Feuchtigkeit durch Böden und Pflanzen bezeichnet.

³⁵³ Präzise Daten dazu sind schwer verfügbar; vgl. aber entsprechende Schätzungen bei: Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald); sowie: EU-JRC (2021, Deforestation). Entsprechende Angaben bewegen sich in der Regel zwischen 17-18% bis hin zu knapp 20%.

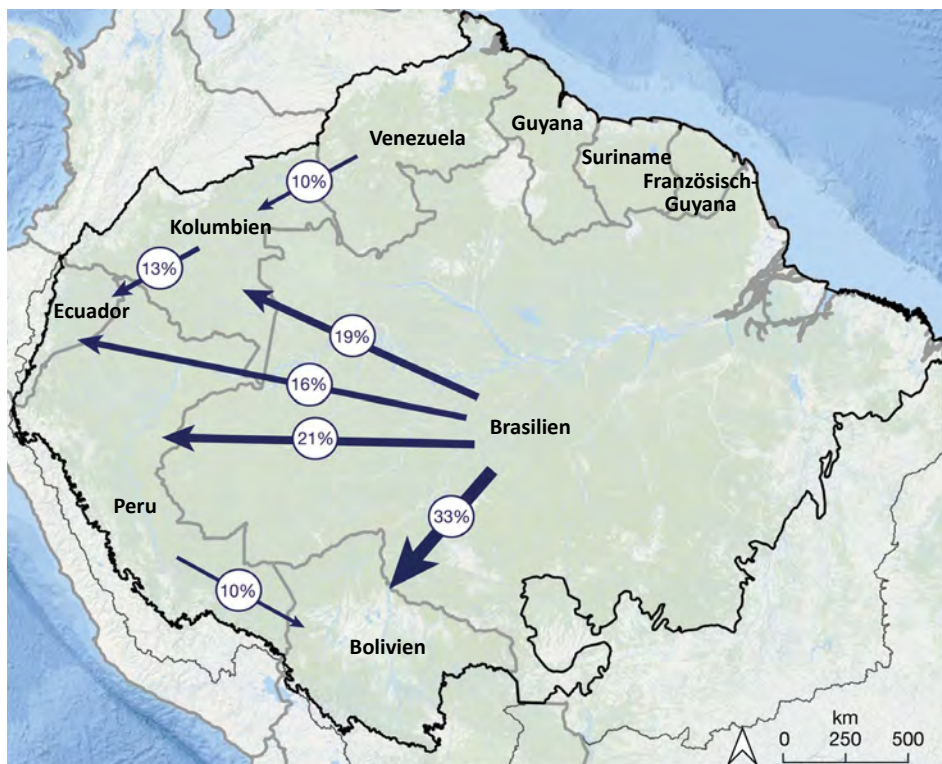
³⁵⁴ Vgl. dazu etwa: Flores et al. (2024, Amazon), S. 556: „Dry season mean temperature is now more than 2°C higher than it was 40 years ago in large parts of the central and southeastern Amazon.“

Abb. 45: Grundlegende Wirkungsweise des Wasserkreislaufs im Amazonas-Regenwald



Quelle: Oro Verde (2025, Regenwald)

Abb. 46: Überregionale Feuchtigkeitsverteilung aus dem Amazonasgebiet



Quelle: Flores (2024, Amazon)

Infolgedessen gehen neuere Analysen davon aus, dass – über die rund 17% Substanzverlust aufgrund überwiegend menschlicher Eingriffe hinausgehend – insgesamt bereits **38% des Regenwaldes** sich in einem **Zustand erhöhter Fragilität** befinden oder ernsthaft geschädigt sein könnten.³⁵⁵

Diese rasch fortschreitende systemische Schwächung beeinträchtigt schon heute die Resilienz des gesamten Amazonas-Ökosystems – und damit auch dessen Funktion und Wirksamkeit als zentraler Regulator und Stabilisator des globalen Klimasystems.³⁵⁶

Noch problematischer erscheint jedoch der Blick in die absehbare nähere Zukunft, denn:

- ▶ Neue Projektionen und Forschungsergebnisse gehen davon aus, dass sich **im Jahr 2050 bis zu 47% des gesamten Amazonas-Regenwalds in einer rapide fortschreitenden Erosion und Transformation** befinden werden, was nicht nur dieses wichtige Ökosystem existenziell gefährdet, sondern auch **negativ auf die Dynamik des globalen Klimawandels** zurückwirkt.³⁵⁷
- ▶ Erschwerend kommt hinzu, dass sich – im Einklang mit der globalen Erwärmung – auch das **Temperaturregime** der Amazonas-Region bereits signifikant verändert hat und sich rapide verschärfen wird: So liegen die Temperaturen während der Trockenzeit in bestimmten Regionen schon heute **2°C höher** als vor 40 Jahren; bis 2050 könnte dieser Anstieg sogar **4°C erreichen – mit schwerwiegenden globalen Folgen!**³⁵⁸



The 1.5°C climate target will not be possible without the Amazon forest.

WWF (2022, Amazon)



Als Folge dieser vielfältigen Einflüsse – vor allem aber der massiven menschlichen Eingriffe – ergibt sich eine weitere **bedrohliche Konsequenz**, denn: Allem Anschein nach hat sich die ursprünglich äußerst positive **globale Klimabilanz** der Amazonas-Region in den letzten Jahren umgekehrt:

- ▶ Von einer weltweit sehr wichtigen **Kohlenstoffsенke**, die der Atmosphäre in großem Maßstab CO₂ entnimmt, ist die Region gemäß neuen Erkenntnissen inzwischen zu einem bedeutenden **Netto-Emittenten von CO₂** mutiert!³⁵⁹
- ▶ Ursache ist die zunehmende „Umwandlung“ von Waldbestand (▷ **CO₂-Speicher**) in andere Aggregatzustände, insbesondere durch **Verbrennen** und **Verfall** (▷ **CO₂-Freisetzung**).³⁶⁰

Eine neuere Analyse untersucht und quantifiziert den (bislang offenbar unterschätzten oder zu wenig beachteten) Nettoeffekt dieser **„umgekehrten Emissionsbilanz“**:

- ▶ „... atmospheric measurements suggest that [the Amazon forest] **has been releasing more carbon than it has absorbed** because of deforestation and forest degradation.“³⁶¹

³⁵⁵ Vgl. dazu insbesondere: Flores et al. (2024, Amazon), (speziell S. 557). Ähnliche Einschätzungen erbringt auch eine Studie von: Csillik et al. (2024, Deforestation).

³⁵⁶ Vgl. dazu ausführlich: WWF (2022, Amazon); Flores et al. (2024, Amazon); analog auch: Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades).

³⁵⁷ Vgl. dazu insbesondere: Flores et al. (2024, Amazon), speziell S. 555: „By combining spatial information on various disturbances, we estimate that by 2050, 10% to 47% of Amazonian forests will be exposed to compounding disturbances that may trigger unexpected ecosystem transitions and potentially exacerbate regional climate change.“

³⁵⁸ Vgl. dazu ausführlich: Flores et al. (2024, Amazon), speziell S. 556: „Dry season mean temperature is now **more than 2°C higher** than it was 40 years ago in large parts of the central and south eastern Amazon. If trends continue, these areas **could potentially warm by over 4°C by 2050.**“; (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁵⁹ Vgl. dazu ausführlich: Gatti et al. (2021, Amazonia); sowie weiterführend den Fachbeitrag von Nico Wunderling: unten, nachfolgender Abschnitt (Box); zitiert auch unter: Wunderling (2025, Amazonas).

³⁶⁰ Vgl. zu den genannten Punkten: Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald) [Autoren: *Conor Purcell, Michael Keary*]; sowie: Zeit (2024, CO₂-Bilanz).

³⁶¹ Csillik et al. (2024, Deforestation); (Hervorhebungen durch Verfasser).

- „Der Ausstoß summiert sich im Untersuchungszeitraum auf 134,6 Millionen Tonnen Kohlenstoff, während durch das Waldwachstum 44,1 Millionen Tonnen aus der Luft aufgenommen wurden. Das ergibt in der Bilanz **Emissionen von jährlich 90,5 Millionen Tonnen Kohlenstoff** zwischen 2106 und 2018 auf der untersuchten Fläche.“³⁶²

Durch diesen **Prozess überproportionaler CO₂-Emission** dürfte die Amazonas-Region mittlerweile sogar deutlich zum Treibhauseffekt und zur globalen Erwärmung beitragen – und durch positive Rückkopplung nicht nur eigene Kippdynamiken beschleunigen, sondern unmittelbar auch auf andere Kippelemente des Erdsystems einwirken und deren Kippunkte näherbringen!



Der südliche Amazonas-Regenwald stößt durch Waldschäden mittlerweile deutlich mehr Kohlendioxid (CO₂) aus, als er aufnimmt.

Zeit (2024, CO₂-Bilanz)



Zusammenfassend folgt daraus:

Der Amazonas-Regenwald und das gesamte Amazonas-Becken bilden ein **weitverzweigtes und sehr wirkmächtiges Ökosystem**. Dieses fördert nicht nur **Biodiversität** und bietet **Lebensraum** für viele

unterschiedliche Arten, sondern wirkt zudem (unter normalen Bedingungen) als „**grüne Lunge**“ und **Bewässerungssystem** für große Teile von Südamerika – aber auch deutlich darüber hinaus.

Über die Vielzahl ihrer unterschiedlichen Eigenschaften und Wirkungsmechanismen fungiert die Amazonas-Region als mächtiger **Stellhebel** und **Regulativ** für wesentliche Teile des Erdsystems. Umgekehrt gibt es jedoch derzeit auch – und mit zunehmender Tendenz – massive **Rückwirkungen** des globalen Klimasystems auf das Amazonas-Ökosystem. Infolgedessen ist die gesamte Amazonas-Region ein eindrucksvolles – zugleich aber auch alarmierendes – Beispiel für die **vielschichtigen Interdependenzen** und die **Dynamik** des globalen Klimasystems.

- Aufgrund dieser enormen Bedeutung – verbunden mit der massiven Schädigung des gesamten Amazonas-Beckens – gelten sowohl der Amazonas-Regenwald als auch die gesamte Amazonas-Region als eines der **absolut zentralen Kippelemente des Erdsystems**.³⁶³

Das Amazonas-Ökosystem als zentrales Kippelement

Die zentrale Rolle der Amazonas-Region als kritischer Stellhebel des Erdsystems ist inzwischen zwar anerkannt, in der **Gesamtheit ihrer möglichen Einflüsse, Auswirkungen und kritischen Interdependenzen** außerhalb der Fachwelt aber noch immer nicht vollständig verstanden.³⁶⁴

Auch die zentrale Frage, wie die mögliche **Kippdynamik** dieses Elements verläuft und welche möglichen **Kippunkte** dabei entscheidend sind, ist derzeit noch Gegenstand intensiver Forschungen. Die Beantwortung dieser Frage wird noch dadurch erschwert, dass:

³⁶² Zeit (2024, CO₂-Bilanz); (Hervorhebungen durch Verfasser); unter Verweis auf die Originalstudie; vgl. dazu: Csillik et al. (2024, Deforestation). Analog dazu auch: WWF (2022, Amazon), S. 11: „At this point it has been observed, from airborne measurements, that CO₂ emissions, in some parts of the biome, are a net positive source of greenhouse gas flux, a change from the past“

³⁶³ Vgl. dazu: PIK (2025, Kippelemente); PIK (2025, Kippdynamiken); sowie sehr ausführlich auch: PIK (2024, Amazonas-Regenwald); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades); sowie WWF (2024, Planet), (insbesondere S. 41-42).

³⁶⁴ Vgl. in diesem Sinne etwa: Flores et al. (2024, Amazon). Analog auch: Wunderling et al. (2021, Climate Domino Effects); Wunderling et al. (2022, Droughts); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades).

- ▶ eine **Vielzahl möglicher Kipodynamiken** (und potentieller Kippunkte) gegeben ist,
- ▶ zwischen diesen Faktoren **intrinsic Interdependenzen** zu berücksichtigen sind,
- ▶ das Gesamtsystem „*Amazonas-Region*“ (etwa über eine **negative CO₂-Emissionsbilanz**, aber auch durch **Reduktion endogener Bewässerungsfähigkeiten**) erheblichen Einfluss auf das globale Klima nimmt und so – im Sinne einer **positiven Rückkopplung** – seinen eigenen Niedergang weiter verschärft und beschleunigt.³⁶⁵

Der Klimawissenschaftler und Erdsystemforscher *Nico Wunderling*, der in diesem Bereich über spezielles Expertenwissen verfügt (auch durch eigene Forschungsaufenthalte vor Ort), gibt dazu einen konzentrierten Überblick:

Der Regenwald des Amazonas – Ein Kippelement unter doppeltem Druck

Der Amazonas-Regenwald gilt als eines der bedeutendsten Kippelemente im Erdsystem. Seine Stabilität wird maßgeblich durch ein fein austariertes Zusammenspiel von Niederschlag, Verdunstung und atmosphärischem Wassertransport bestimmt. Doch dieses Gleichgewicht ist zunehmend bedroht – insbesondere durch den Klimawandel, der vermehrt zu Dürren führt,³⁶⁶ und durch großflächige Abholzung. Beide Stressoren wirken nicht nur unabhängig voneinander, sondern verstärken sich gegenseitig in ihrer Wirkung.³⁶⁷

Ein zentrales Element der Amazonas-Stabilität ist, dass der Regenwald seinen eigenen Regen produziert: Bäume nehmen Wasser aus dem Boden auf und geben es über Transpiration wieder an die Atmosphäre ab; zudem spielt auch **direkte Verdunstung** (engl.: *interception evaporation*; deutsch: Abfangverdunstung) des Regens, der den Boden nie erreicht hat, eine wichtige Rolle. Insgesamt stammen bis zu 50% des Regens

im Amazonasgebiet aus dieser eigenen Verdunstung. Wird dieser Kreislauf gestört – etwa durch Baumverlust infolge von Abholzung oder durch trockenere klimatische Bedingungen –, kann es zu einer **Abwärts-spirale** kommen, in der der Regenwald zunehmend seine Fähigkeit verliert, sich selbst zu erhalten.

Der aktuelle Wissensstand aus dem *Global Tipping Points Report* quantifiziert den Kippunkt des Regenwalds zwischen einem globalen Temperaturanstieg von 2,0 bis 6,0°C mit einem wahrscheinlichen Bereich zwischen 3,0 bis 5,0°C. Wird jedoch auch die Abholzung berücksichtigt, könnte ein großflächiges Kippen des Systems bereits bei einer globalen Erwärmung innerhalb des Pariser Klimakorridors (1,5 bis 2,0°C) eintreten, wenn die abgeholzte Fläche einen Wert über 20% überschreitet.³⁶⁸ Außerdem können sich Kippenereignisse in Form von **Kaskadeneffekten** über große Entfernungen weiter verbreiten und bleiben somit nicht unbedingt isoliert.³⁶⁹

- ▶ Eine einmal eingetretene Destabilisierung kann somit **weitreichende Auswirkungen auf nachgelagerte Gebiete** haben, selbst wenn diese lokal noch relativ stabile Bedingungen aufweisen.

Trotz dieser düsteren Aussichten ist ein Kippen des Amazonas-Regenwalds nicht unausweichlich. Die Vermeidung weiterer Abholzung – insbesondere im östlichen Amazonasbecken, wo die Verdunstung stark zu den Niederschlägen im restlichen Gebiet beiträgt – und ambitionierter Klimaschutz mit einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter 1,5°C könnten entscheidend dazu beitragen, den Amazonas-Regenwald insgesamt zu stabilisieren. Zusätzlich birgt die gezielte Wiederaufforstung („*Arcs of Restoration*“) das Potential, die Feuchtigkeitsrückkopplungen zumindest teilweise wiederherzustellen und damit die Resilienz des Regenwaldes zu stärken (siehe z.B. *Black Jaguar Foundation*³⁷⁰).

³⁶⁵ Vgl. dazu ausführlich: nachfolgende Info-Box mit Expertenbeitrag von *Nico Wunderling*; auch zitiert unter: Wunderling (2025, Amazonas).

³⁶⁶ Vgl. Cook et al. (2020, Drought); Parsons (2020, Implications); Nobre et al. (2016, Risks); Marengo et al. (2024, Drought).

³⁶⁷ Vgl. Nobre et al. (2019, Brazil); Flores et al. (2024, Amazon).

³⁶⁸ Vgl. Lovejoy/Nobre (2019, Amazon); Flores et al. (2024, Amazon).

³⁶⁹ Vgl. Wunderling et al. (2022, Droughts).

³⁷⁰ Vgl. Black Jaguar Foundation (2025, Project).

Kritische Kippunkte des Amazonas-Ökosystems

Der Amazonas-Regenwald gilt als **zentrales Klimakipppunkt**, da sich das Gebiet bei zunehmendem Substanzverlust (durch Abholzung, Baumsterben, Feuer) massiv verändern und „... in eine Savanne oder savannenähnliche Umgebung verwandeln könnte.“³⁷¹

Hinter dieser möglichen Entwicklung steht der Trend einer **zunehmenden Austrocknung** des Amazonas-Ökosystems, die aus mehreren Ursachen resultiert:

- Einerseits bewirkt eine Reduktion des Baumbestandes automatisch einen **Verlust der endogenen Verdunstungsfähigkeit**. Dadurch wird der „fliegende Fluss“ in seiner wichtigen Bewässerungswirkung eingeschränkt, sowohl in seiner Quantität als auch seiner regionalen Verteilung.³⁷²
- Hinzu kommt bei rückläufiger Vegetation eine **fortschreitende Bodenerosion**, die wiederum ein Austrocknen größerer Landflächen begünstigt.³⁷³
- Als übergeordneter Treiber wirkt jedoch vor allem die **globale Erwärmung** selbst, die eine **fortschreitende Degradation** der tropischen Vegetation mit sich bringt. Dieser Aspekt wirkt dann – über eine **direkte Rückkopplung** mit dem globalen Klimasystem – wieder auf sich selbst zurück, was den Prozess des Austrocknens weiter vorantreibt.³⁷⁴

Vor diesem Hintergrund spricht WWF (2007) auch explizit vom „**Teufelskreis am Amazonas**“.³⁷⁵

Aufgrund dieser komplexen Mechanismen und vielfältigen Einflussfaktoren ist die Frage nach dem **möglichen Kippunkt** des Amazonas-Tropenwaldes nicht leicht zu beantworten. Grundsätzlich hängt diese Frage von **mehreren Entwicklungen und Treibern** ab, die sich prinzipiell gegenseitig verstärken können, zugleich aber auch **Gegenstand individueller Rückkopplungseffekte** sind:³⁷⁶

- Einerseits ist es primär der **Trend der globalen Erwärmung**, der zu einer anhaltenden, fortschreitenden und sich selbst verstärkenden Tendenz zunehmender Austrocknung führt.
- Andererseits sind es vor allem die **großflächigen Eingriffe des Menschen**, insbesondere durch Abholzung oder Brandrodung, die den Waldbestand der Amazonas-Region aktiv schädigen.

Aus diesem Grund gibt es **unterschiedliche Ansätze**, wodurch ein mögliches „Umkippen“ der Amazonas-Region induziert sowie entsprechende Kippunkte ausgelöst werden können:

- ▶ **Waldfläche**: Aktuelle Einschätzungen gehen davon aus, dass bei einem **permanenten Verlust der Amazonas-Regenwaldfläche in der Größenordnung von 20 bis 25%** (also nur wenig mehr als heute schon realisiert!) „... der Kippunkt erreicht wird, der den Regenwald in eine waldlose Savanne verwandelt.“³⁷⁷
- ▶ **Temperatur**: Parallel dazu gilt auch ein **Anstieg der regionalen Temperatur um etwa 2,0 bis 6,0°C** (mit einem wahrscheinlichen Bereich zwischen 3,0 bis 5,0°C) als möglicher Kippunkt für das Amazonas-Ökosystem.³⁷⁸



Gibt es weniger Bäume, gibt es weniger Regen – und wiederum weniger Bäume.

WWF (2024, Kollaps)



³⁷¹ Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald); [Autoren: *Conor Purcell, Michael Keary*].

³⁷² Vgl. dazu ausführlich: WWF (2022, Amazon); sowie: WWF (2024, Kollaps).

³⁷³ Vgl. dazu ausführlich: WWF (2022, Amazon).

³⁷⁴ Vgl. dazu ausführlich: WWF (2022, Amazon); sowie bereits: oben, vorherige Abschnitte.

³⁷⁵ WWF (2007, Amazonas); zu weiterführenden Darstellungen vgl. insbesondere: WWF (2024, Planet), S. 42.

³⁷⁶ Vgl. dazu ausführlich auch: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 81 ff.

³⁷⁷ Vgl. dazu: Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald); (dort auch das Zitat). In diesem Sinne auch: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 81 (dort werden „20-40%“ als kritische Schwelle genannt). Vgl. dazu grundlegend auch: Lovejoy/Nobre (2018, Amazon).

³⁷⁸ Vgl. dazu: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades); sowie: oben, Infobox (Expertenbeitrag). Viele dieser Schätzungen gehen zurück auf die Studie von: Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points).

Beide Kippunkt-Szenarien verweisen letztlich auf einen sehr ähnlichen Wirkungsmechanismus: Dabei geht der gesamten Region in großem Maßstab **Feuchtigkeit verloren** – die für den Selbsterhalt der Vegetation aber dringend erforderlich ist.

- ▶ Die daraus resultierende „**Austrocknung**“ des **Regenwald-Ökosystems** (die wiederum massive Rückkopplungseffekte auf das globale Klimasystem hätte) wird auch als „**Amazon Dieback**“ bezeichnet.³⁷⁹

Der Begriff „**Amazon Dieback**“ bezeichnet das mögliche großflächige Absterben (Zusammenbruch) des Amazonas-Regenwaldes als Folge von Klimawandel, Entwaldung, Brandrodung und wiederkehrenden Dürren. Wissenschaftler sprechen davon, dass das Ökosystem durch diese Belastungen Widerstandskraft verliert und kurz vor einem sogenannten Kipppunkt („**Tipping Point**“) steht, ab dem sich große Teile des Amazonas nicht mehr als Regenwald erholen, sondern sich dauerhaft in eine Savannenlandschaft verwandeln.³⁸⁰

Die Folgen einer solchen Entwicklung hin zum „**Amazon Dieback**“ wären äußerst schwerwiegend, sowohl für die Amazonas-Region selbst als auch für das globale Klimasystem. Die entsprechenden Mechanismen und Auswirkungen sind vielfältig und umfassen eine **Umkehrung der CO₂-Bilanz**, veränderte **Niederschlagsmuster** sowie eine generelle **Verstärkung der globalen Erwärmung**.

Dazu erklären die Klimaexperten Purcell/Keary (2023):

- ▶ „Schätzungen der Weltbank zufolge wird die **Transformation** des Amazonasgebiets von einem Regenwald in eine Savanne und damit **von einer Kohlenstoffsenke in eine Kohlenstoffquelle** die Folgen des Klimawandels andernorts noch verschärfen. So können beispielsweise die **veränderten Niederschlagsmuster** die Ernährungssicherheit in Ländern weit jenseits des Regenwaldes gefährden.“³⁸¹

Als Zeithorizont für ein solches „Umkippen“ der Amazonas-Region im Rahmen eines **Amazon Dieback** wurde bis vor kurzem noch ein **Intervall von 50 bis 200 Jahren** unterstellt: „... a minimum likely time scale of 50 years (with an average likely time scale of 100 years and a maximum of 200 years).“³⁸²

Allerdings stellt sich dieses Szenario deutlich gravierender dar, sobald auch **wechselseitige Interaktionen** – also mögliche **Interdependenzen** und selbstverstärkende **Rückkopplungen** – zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren berücksichtigt werden, denn:

- ▶ „... the impacts of the global temperature increase will **not act in isolation** but will **interact with other tipping point threshold elements** with the **potential for positive feedbacks**.“³⁸³

Werden derartige Wechselwirkungen und „Feedbackschleifen“ explizit berücksichtigt, so ergibt sich ein **deutlich verändertes Bild**, denn: Gemäß neuerer Modellierungen, die eine **simultane und interdependente Berücksichtigung** der beiden oben genannten Haupteinflussfaktoren („**Waldfläche**“ und „**Temperaturanstieg**“) zugrunde legen, könnten Kipppunkte der Amazonas-Region **deutlich früher** ausgelöst werden als bislang unterstellt!

Als kritische Größe erweist sich dabei insbesondere der Faktor „**Waldfläche**“, sobald dessen Verlust (insbesondere durch weitere Abholzung) einen **Wert von rund 20%** übersteigt:

³⁷⁹ Vgl. in diesem Sinne etwa: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 81; ausführlich dazu auch: WWF (2022, Amazon).

³⁸⁰ Wortgleiches Ergebnis einer entsprechenden KI-Recherche; unter: Perplexity (2025, Dieback).

³⁸¹ Conor Purcell und Michael Keary, zitiert nach: Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald).

³⁸² WWF (2022, Amazon), S. 18.

³⁸³ WWF (2022, Amazon), S. 18; (Hervorhebungen durch Verfasser).

- In diesem Fall könnte „... ein großflächiges Kippen des Systems bereits bei einer globalen Erwärmung innerhalb des Pariser Klimakorridors (1,5-2,0°C) eintreten.“³⁸⁴

Da die Welt sich bereits relativ schnell auf diese Temperaturwerte zubewegt, würde dies für das Amazonas-System auf ein **zeitlich deutlich näherliegendes Risikoszenario** hindeuten.³⁸⁵

Verantwortlich dafür ist vor allem die **Interaktion** und **gegenseitige Verstärkung** unterschiedlicher Einflussfaktoren: Ein deutlicher Rückgang der Waldfläche (über den kritischen Wert von 20% hinaus) würde sowohl **Verdunstungs- und Bewässerungskapazitäten** massiv beeinträchtigen als auch die **CO₂-Absorption** der Amazonas-Region vermindern sowie die **Resilienz von Böden und Vegetation** progressiv verschlechtern.³⁸⁶

Gleichzeitig würde die anhaltende **globale Erwärmung**, die das Ökosystem ohnehin schon stark belastet, durch **vermehrten Netto-CO₂-Ausstoß** des Regenwaldes (sowie regional zunehmende Methan-Emissionen) dauerhaft verstärkt. Weitere bislang wenig beachtete oder unterschätzte Einflussfaktoren könnten den Gesamteffekt noch weiter verschärfen.³⁸⁷

Eine Darstellung von *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) 2024* differenziert die zentralen Einflussfaktoren noch weiter; dabei „... identifizieren die

Forscher **fünf kritische Faktoren**, die mit diesem Kippunkt in Verbindung stehen: die globale **Erwärmung**, die jährlichen **Niederschlagsmengen**, die Intensität der saisonalen **Niederschlagsveränderungen**, die Länge der **Trockenzeit** und die fortschreitende **Abholzung**.“³⁸⁸

Zu dieser ausgeprägt **nichtlinearen Prozessdynamik** des Amazonas-Systems erklärt übereinstimmend – und unter Verweis auf die daraus resultierenden **Sprungrisiken** – auch WWF (2022):

- „The nature of how systems creep towards a tipping point poses a challenge to policy making. **There are many unknowns**. Long term observations, experiments and model simulations – the full toolkit of research – all indicate that the forest **may not change gradually** as pressure mounts, but **could rather change abruptly in response to the non-linear way different pressures (from climate, fire and land use) interact**.“³⁸⁹

Auch am Beispiel des Amazonas-Systems zeigt sich so die **grundlegende Dynamik komplexer Systeme**, die bislang oft noch unterschätzt wurde – oder in vielen Klimamodellen schlichtweg nicht hinreichend (oder gar nicht) einbezogen wurde.³⁹⁰

Ob aber aus dieser Erkenntnis auch ein Umkippen des Amazonas-Regenwalds schon in naher Zukunft abgeleitet werden kann, ist vorerst weiter umstritten.³⁹¹

³⁸⁴ Auf diesen wichtigen Aspekt verweist explizit Wunderling (2025; oben „Kommentarbox“) und betont, unter Verweis auf andere Studien: „Wird jedoch auch die Abholzung berücksichtigt, könnte ein großflächiges Kippen des Systems bereits bei einer globalen Erwärmung innerhalb des Pariser Klimakorridors (1.5-2.0°C) eintreten, wenn die abgeholzte Fläche einen Wert über 20% überschreitet.“

³⁸⁵ Klare Schätzungen dazu liegen allerdings noch nicht vor, da weiterhin zahlreiche Unsicherheiten bestehen; vgl. zum aktuellen Stand ausführlich: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 79-89.

³⁸⁶ Zu dem engen Zusammenhang zwischen Entwaldung und Niederschlagsmustern erklärt etwa: WWF (2007, Teufelskreis): „Das Ausbleiben von Niederschlag durch Entwaldung scheint häufiger zu werden, wenn die gerodeten Flächen mehr als 30 Prozent ausmachen.“

³⁸⁷ Ähnlich argumentiert auch: Germanwatch (o.A., Austrocknung): „Drei sich wechselseitig verstärkende Faktoren könnten diese dramatische Veränderung auslösen: 1.) die Austrocknung durch eine überproportionale Temperaturerhöhung, 2.) die weiter fortschreitende Abholzung sowie 3.) ein erwartetes Ausbleiben des natürlichen Nährstofftransports durch Sandstürme aus der afrikanischen Sahelzone nach Brasilien im Fall einer möglichen Ergrünung von Teilen der Sahelzone. Die verschiedenen Rückkopplungseffekte könnten zu einer enormen zusätzlichen Erwärmung führen.“

³⁸⁸ PIK (2024, Amazonas-Regenwald): „Für jeden dieser Faktoren schlagen sie klare Belastungsgrenzen vor, um die Widerstandsfähigkeit des Amazonas zu erhalten.“ Diese Darstellungen beziehen sich auf die Originalstudie von: Flores et al. (2024, Amazon).

³⁸⁹ WWF (2022, Amazon), S. 12; (Hervorhebungen durch Verfasser).

³⁹⁰ Vgl. dazu grundlegend auch: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 79: „As with many other complex systems, ecosystems have been proposed to feature nonlinear changes such as tipping points ...“; vgl. dazu ausführlich auch bereits: oben, Kap. 4.2; vgl. zur Problematik teilweise unzureichend spezifizierter Klimamodelle grundlegend auch: MPI-M (2024, Klimaprojektionen).

³⁹¹ Vgl. zum aktuellen Stand der Forschung: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 79-89.

Dennoch sollte der Menschheit klar bewusst sein, welche **zentrale Rolle die Amazonas-Region** – und deren Stabilität – für den weiteren Verlauf und die möglichen Auswirkungen des globalen Klimawandels einnimmt, denn:

- ▶ „**THE 1.5°C CLIMATE TARGET WILL NOT BE POSSIBLE WITHOUT THE AMAZON FOREST.**“³⁹²

Direkte und indirekte Interdependenzen mit anderen Kippelementen und Kippdynamiken:

Starke direkte Auswirkung eines **Amazonas-Diebacks** auf Windsysteme, Niederschlagsmuster und Wasserkreisläufe in Südamerika und darüber hinaus.

Starke indirekte (globale) Auswirkungen über **geringere CO₂-Absorption (& erhöhte CO₂-Emission)**: Zunahme der globalen **Erwärmungstendenz** und dadurch **positive Rückkopplung** mit anderen Kippelementen (▷ Verstärkung/Beschleunigung der jeweiligen Kippdynamiken).

Insgesamt: Klare Interdependenz/Verstärkung/Rückkopplung mit **Erderwärmung**.

5.5 Ozeanische Erwärmung und Versauerung

Die derzeitige wissenschaftliche Konvention erfasst das **Phänomen der ozeanischen Erwärmung** üblicherweise nicht im Rahmen der primären oder „kritischen“ Klimatelemente. Dennoch hat genau dieses Phänomen – nicht zuletzt durch zahlreiche Verstärkungs- und Rückkopplungseffekte – sehr bedeutende Auswirkungen auf nahezu alle Bereiche des Erdsystems und des globalen Klimas.

- ▶ Entsprechend dieser weitreichenden Bedeutung wird die ozeanische Erwärmung nachfolgend explizit einer vertieften und zugleich vernetzten Analyse unterzogen.

Damit knüpft die vorliegende Analyse an frühere Studien des FERI Cognitive Finance Institute an, die sich bereits ausführlich mit den Ozeanen in ihrer Eigenschaft als wichtige planetare Lebensräume und Stabilisatoren des Erdsystems beschäftigt haben:



Ozeanische Klimasysteme

Die Ozeane sind ein elementarer Teil des globalen Klimasystems. Durch Verteilung und Zirkulation enormer Wassermengen sowie durch massive Verdunstung tragen sie unmittelbar zur Entstehung und zur Dynamik globaler Klimaphänomene bei. Dieser komplexe Prozess einer „dreidimensionalen Zirkulation im gesamten Weltozean“ führt zu typischen **planetarischen Großwetterlagen**, darunter etwa die (Monsoon-)Regenzeit in Asien oder die Entstehung tropischer Wirbelstürme in der Karibik.³⁹³

“

Der Ozean ist der größte Einflussfaktor und Motor des globalen Klimasystems.

Biber et al. (2022, Blue Economy)

”

³⁹² WWF (2022, Amazon), S. 6; (Hervorhebungen im Original).

³⁹³ Vgl. dazu ausführlich und weiterführend: Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 8-11, Zitat: S. 9.

Auch die regelmäßig wiederkehrenden Phänomene „El Niño“ und „La Niña“, die sich insbesondere in Lateinamerika in Form verstärkter Trockenheit oder durch andere Extremwetterereignisse deutlich bemerkbar machen, sind **Ergebnis ozeanischer Zirkulationsanomalien**.³⁹⁴

- ▶ Der Schwerpunkt liegt dabei im **äquatorialen Pazifik** und betrifft vor allem die Südhalbkugel, doch die Effekte der Oszillationen sind meist weltweit in Form **außergewöhnlicher Naturereignisse und Wetteranomalien** spürbar.³⁹⁵

In einem relativ **stabilen Klimasystem** sind derartige Oszillationen natürliche Folge globaler ozeanischer Fluktuationen und Strömungsverläufe. Dies führt wiederum zu einer relativ hohen Stabilität globaler Klimazonen und einer gewissen Regelmäßigkeit bestimmter Wetterereignisse, darunter jährlich wiederkehrende Regenzeiten etwa in Afrika oder in Südostasien. Indem sie große Mengen an Wärme und Energie speichern und über komplexe Strömungssysteme weiterverteilen, regulieren die Ozeane also „... die Zyklen der Jahreszeiten auf der ganzen Welt.“³⁹⁶

- ▶ Es ist diese **klimatische Zyklizität** und Berechenbarkeit (insbesondere von wichtigen Regenzeiten), die in vielen Weltregionen die Ansiedlung – und vor allem die Ernährung – von Menschen erst möglich macht. So wäre etwa der Reisanabau in Asien, von dem weltweit über 4 Milliarden Menschen abhängen, ohne regelmäßigen **Monsun** kaum vorstellbar.³⁹⁷

Im Gegensatz dazu bietet ein instabiles ozeanisches Klimasystem erheblich **geringere zyklische Berechenbarkeit**. Stattdessen resultiert eine klimatisch deutlich **erhöhte Volatilität**, mit einem – möglicherweise katastrophal – höheren Ausmaß

an Unwettern und anderen Wetterextremen. Die Ursache dafür scheint offensichtlich, denn:

Nach heutigem Stand der Klimawissenschaft sind die ozeanischen Klimasysteme bereits **deutlich fragiler** als noch vor einigen Jahren:

- ▶ Entsprechend treten zuletzt in vielen exponierten Regionen der Welt **katastrophale Unwetter und Überflutungen** – aber auch **zerstörerische Trockenperioden** – mit deutlich erhöhter Frequenz und Intensität auf.³⁹⁸
- ▶ Im Pazifik wurde 2025 erstmals ein **Zusammenbruch lokaler Zirkulationsmuster** im Golf von Panama festgestellt, der dort typischerweise aus einem relativ stabilen Zusammenspiel von Wind- und Meeresströmungen resultiert.³⁹⁹
- ▶ Auch die Entstehung sehr starker **tropischer Wirbelstürme** mit enormer Zerstörungskraft scheint in den letzten Jahren signifikant zuzunehmen (Zyklone im Westpazifik; Hurrikane in der Karibik sowie im Atlantik).⁴⁰⁰ (Vgl. dazu Abb. 47, S. 100 mit einer eindrucksvollen Darstellung).



Allerdings wird in den tropischen Regionen der Anteil besonders starker und damit zerstörerischer Stürme weiter zunehmen.

World Ocean Review (2024, Klimakrise)



³⁹⁴ Vgl. dazu etwa: GEO (2024, El Niño).

³⁹⁵ Vgl. dazu etwa: DWD (o.A., El Niño); Tagesschau (2023, Wetterphänomen).

³⁹⁶ Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 8.

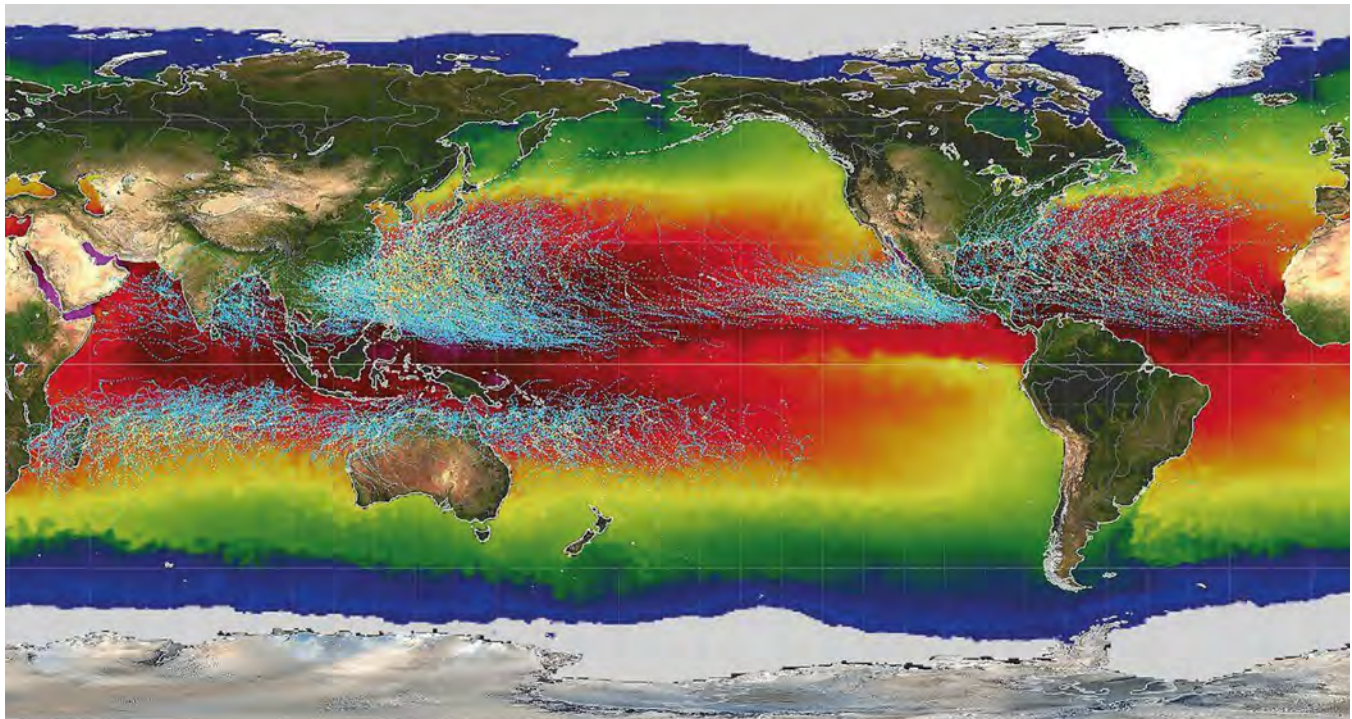
³⁹⁷ Vgl. dazu etwa: MPIMP (2015, Welthunger): „Reis ist das Hauptnahrungsmittel für mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung und ist somit eine der wichtigsten Nutzpflanzen der Erde.“; ergänzend auch: Pflanzenforschung (2010, Reis); Statista (2024, Reis).

³⁹⁸ Vgl. dazu etwa: ARD alpha (2023, Stürme).

³⁹⁹ Vgl. dazu: ntv (2025, Meeresströmung): „Im Golf von Panama ist zum ersten Mal seit Beginn der Messungen die dortige Auftriebsströmung fast völlig ausgeblieben.“

⁴⁰⁰ Vgl. dazu grundlegend: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 19-21; sowie: Welt der Physik (o.A, Wirbelstürme); Hoyos et al. (2006, Hurricane); zurückhaltender jedoch: Curry (2019, Hurricanes). Ergänzend dazu auch: SWR (2025, Wirbelstürme).

Abb. 47: Deutliche Zunahme extremer „Superstürme“



Zugbahnen tropischer Wirbelstürme von 1985 bis 2005 über einer Karte der Ozeantemperaturen. (Blaue Linien kennzeichnen Wirbelstürme)

Quelle: Wetter.de (2024, „Superstürme“)

Ozeane als Wärmespeicher und CO₂-Senken

Als hauptverantwortlich für diese Transformation des ozeanischen Klimasystems gilt die über viele Jahre laufend zunehmende globale Erwärmung. Dabei wird oftmals unterschätzt, dass der größte Anteil der planetaren Aufheizung sich in den weltweiten Meeren und Ozeanen konzentriert, denn:

- ▶ „Mehr als 90% der planetarischen Wärme wird von den Ozeanen absorbiert.“⁴⁰¹

Diese Aussage wird durch Untersuchungen der **planetaren Energiebilanz** bestätigt, die speziell in den letzten Jahrzehnten eine enorme Steigerung der Energie- und Wärmeaufnahme durch die Weltmeere nachweisen (vgl. dazu Abb. 48).⁴⁰²

Gleichzeitig dienen die Ozeane auch als die größten **CO₂-Senken** des Planeten, indem sie erhebliche Teile der globalen Treibhausgasemissionen absorbieren, denn:

- ▶ „Der Weltozean ist der **zweitgrößte Kohlenstoffspeicher der Erde**. Er enthält etwa 40 000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Mit diesem Reservoir übertrifft der Ozean den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre um mehr als das 50-Fache.“⁴⁰³
- ▶ Gemäß aktuellem Stand der Forschung „... haben die Ozeane bis heute **etwa die Hälfte** des vom Menschen seit dem Beginn der Industrialisierung ausgestoßenen und durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe entstandenen Kohlendioxids aufgenommen.“⁴⁰⁴

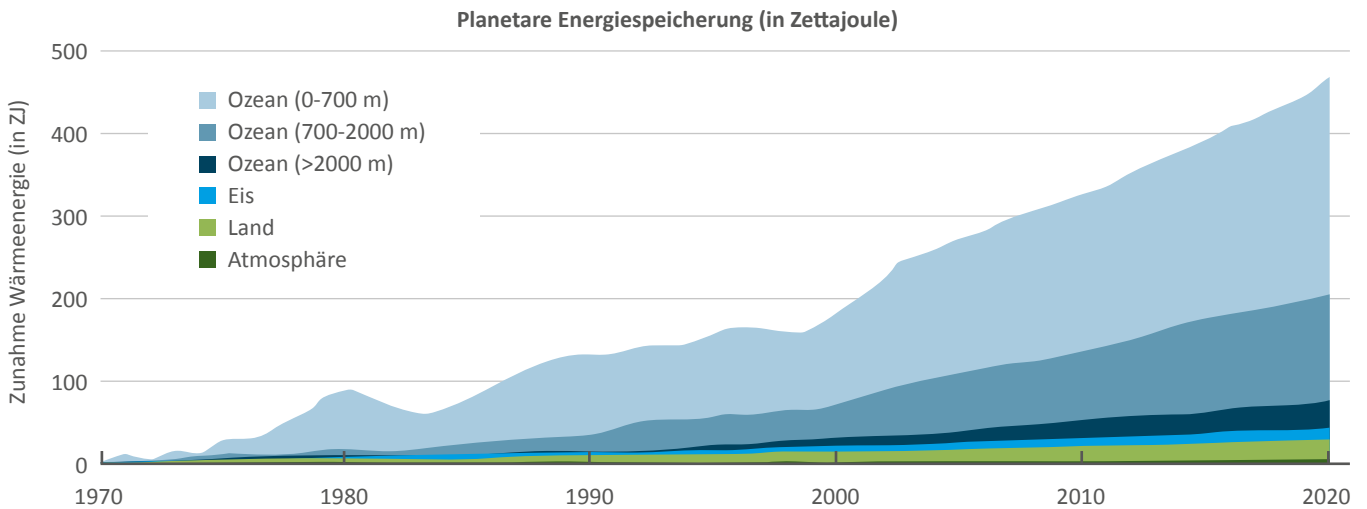
⁴⁰¹ Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 9.

⁴⁰² Vgl. dazu insbesondere: Forster et al. (2025, Indicators).

⁴⁰³ World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf); (Hervorhebungen durch Verfasser). Als „Senken“ werden natürliche oder künstliche Reservoirs bezeichnet, die CO₂ und andere Treibhausgase aufnehmen und binden. Das *Climate Dictionary* der UN erklärt unter dem Stichwort „Carbon sink“: „Oceans absorb carbon dioxide from the atmosphere through marine ecosystems and the plant and animal life they harbor.“; UNDP (2023, Climate), S. 17. Vgl. dazu auch: Biber et al. (2022, Blue Economy); sowie Réthy-Jensen (2025, Carbon Capture).

⁴⁰⁴ World Ocean Review (2010, Weltmeere), S. 14. Vgl. dazu bereits grundlegend: AWI (2010, Perspektive), S. 26: „Als Konsequenz enthält der Ozean 50-mal mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre.“

Abb. 48: Massive Aufnahme von Wärmeenergie durch die Ozeane



Quelle: Forster et al. (2025, Indicators)

Diese Funktion als gigantischer „Zwischenspeicher“ hat nach Ansicht vieler Wissenschaftler erheblich dazu beigetragen, dass die Auswirkungen des Klimawandels bislang noch vergleichsweise moderat geblieben sind, denn:

- ▶ „So hat der Weltozean **in den zurückliegenden Jahrzehnten etwa 25 Prozent** der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre aufgenommen und so die Erderwärmung maßgeblich gebremst.“⁴⁰⁵
- ▶ „Ohne die Absorption von Wärme durch die Ozeane wäre die Erwärmung der Atmosphäre heute viel dramatischer.“⁴⁰⁶

Klimaforscher sprechen hier auch von einem inhärenten „**Trägheitseffekt**“ des Klimas, dessen vielfältige Teilsysteme über unterschiedliche Zeiträume hinweg evolvieren und interagieren.⁴⁰⁷

Vieles deutet jedoch darauf hin, dass dieser scheinbare Vorteil sich schon bald in einen gravierenden Nachteil verwandeln wird:

- ▶ Zum einen scheint die weitere Absorptionsfähigkeit der Ozeane – sowohl für CO₂-Emissionen als auch für Wärmeenergie – inzwischen bereits an klare Grenzen zu stoßen. Jedes weitere Anwachsen dieser Faktoren wird somit automatisch problematisch.⁴⁰⁸
- ▶ Zum anderen hat bereits der bisherige Effekt dieser Wärmeaufnahme durch die Ozeane zu einem **markanten Anstieg der durchschnittlichen Meerestemperatur** geführt.⁴⁰⁹ (Vgl. dazu Abb. 49, S. 102).

⁴⁰⁵ World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf); (Hervorhebungen durch Verfasser). [Anm. d. Verf.: Gemeint ist hier nur ein begrenzter Zeitraum von wenigen Jahrzehnten – im Gegensatz zum vorherigen Zitat.]

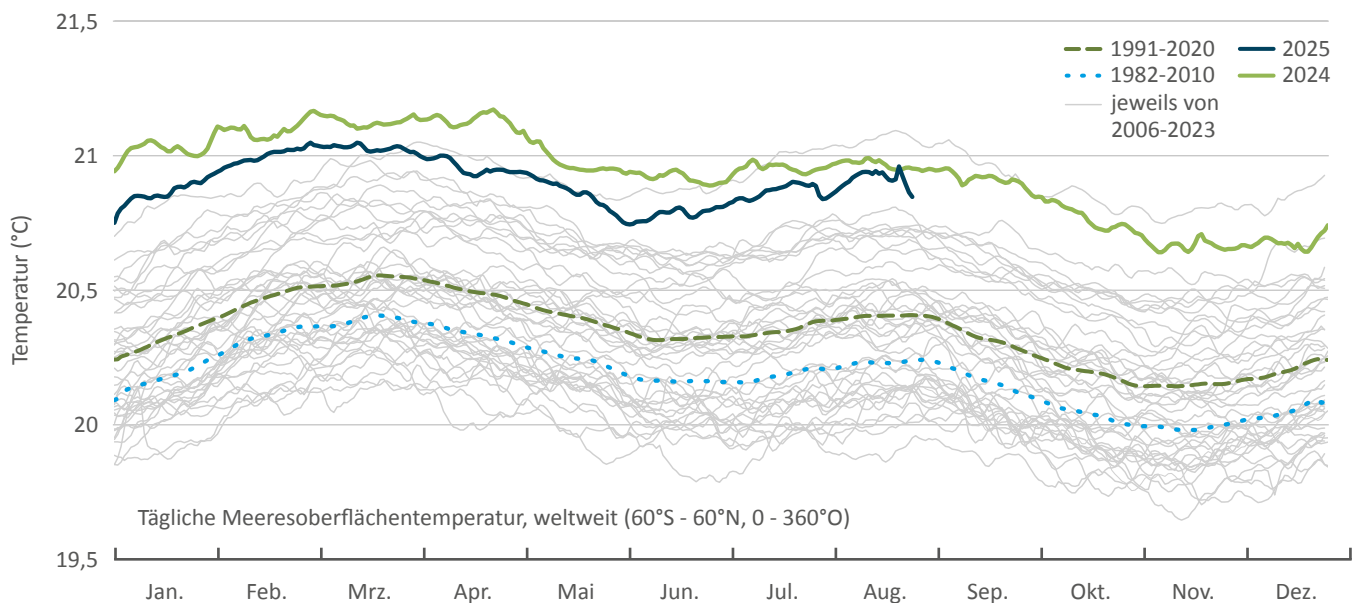
⁴⁰⁶ Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 9.

⁴⁰⁷ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 4.2; sowie ausführlich und mit zahlreichen Erklärungsansätzen: World Ocean Review (2010, Weltmeere): „Die Trägheit des Klimas wird dazu führen, dass sich selbst lange nach der Stabilisierung der CO₂-Konzentration das Klima weiter verändern wird.“ (S. 15).

⁴⁰⁸ Vgl. dazu Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 9: „Ein erheblicher Teil der Aufnahme von CO₂-reichem Oberflächenwasser wird durch die ozeanische Umwälzzirkulation ermöglicht. Es wird jedoch erwartet, dass diese abnehmen wird. Folglich könnte der Ozean in Zukunft nicht in der Lage sein, seinen derzeitigen Anteil an den anthropogenen CO₂-Emissionen zu absorbieren, was die Auswirkungen des Klimawandels pro emittierter Tonne CO₂ verstärken würde.“

⁴⁰⁹ Vgl. dazu überblickartig etwa: Climate Reanalyzer (2025, Temperature); Statista (2025, Ozeane).

Abb. 49: Deutlicher Anstieg der weltweiten Meerestemperaturen



Quelle: Climate Reanalyser (2025, Temperature)

Interdependenzen mit anderen Teilsystemen

Die zunehmende Erwärmung der Ozeane und deren Zusammenhang mit dem übergeordneten emissionsbedingten „Treibhauseffekt“ ist offensichtlich und wird in einer Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen nachgewiesen.⁴¹⁰

► Dahinter liegt ein **klarer Trend**, der sich speziell in den letzten Jahren deutlich verstärkt und offenbar auch beschleunigt hat – insbesondere im Atlantik (vgl. dazu Abb. 50).⁴¹¹

Genau dieser Aspekt ist von enormer Bedeutung für eine Vielzahl **komplexer Interdependenzen**, die mit dem globalen Klimasystem in unmittelbarer Verbindung stehen – und bereits klare Anzeichen einer **sehr dynamischen Progression** erkennen lassen:

- Mit zunehmender Meerestemperatur kommt es zu einem massiven **Verlust an Biodiversität** in den Weltmeeren – die „**Korallenbleiche**“ ist dafür bereits ein sehr sichtbares Symptom.⁴¹²
- Neuere Messungen bei photosynthetischen Mikroorganismen („*Prochlorococcus*“) deuten zudem darauf hin, dass sich mit zunehmender Erwärmung auch die **Sauerstoffproduktion** in den Ozeanen deutlich verringern könnte.⁴¹³
- Die vermehrte Aufnahme von CO₂ führt zwangsläufig auch zu einer **Übersäuerung** der Ozeane, was für viele Meeresorganismen eine lebensfeindliche Umgebung hervorruft.⁴¹⁴

⁴¹⁰ Vgl. dazu etwa die aktuelle Untersuchung von: Merchant et al. (2025, Warming); sowie ergänzend: Tagesschau (2025, Meerestemperaturen); Tagesschau (2025, Ozeane).

⁴¹¹ Vgl. dazu insbesondere: Rahmstorf (2024, Tipping Point); (mit Verweis auf andere Datenquellen); Merchant et al. (2025, Warming). Grundlegend dazu auch bereits: AWI (2010, Perspektive).

⁴¹² Vgl. dazu etwa: MPG (2024, Korallenbleiche); sowie ausführlich und mit weiteren Nachweisen: unten, Abschnitt zu „Korallensterben“.

⁴¹³ Vgl. dazu: ntv (2025, Organismus).

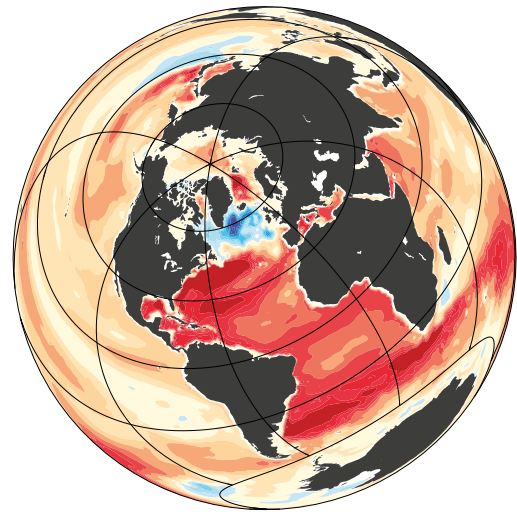
⁴¹⁴ Vgl. dazu etwa: World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf): „Eine der wichtigsten chemischen Veränderungen im Zuge der steigenden Kohlendioxidaufnahme des Weltozeans ist die zunehmende Versauerung. Seit Beginn der Industrialisierung ist der Säuregehalt des Ozeans um 26 Prozent gestiegen – eine Veränderung, wie sie die Weltmeere in den vergangenen Jahrtausenden noch nicht erlebt haben. Mittlerweile reicht das Versauerungssignal in einigen Meeresregionen in Tiefen von mehr als 2000 Metern und beeinträchtigt die Lebensbedingungen vieler Meeresorganismen.“

- Wärmere Meere speichern per Definition größere Mengen an **thermischer Energie** – dies führt rein thermodynamisch zu einer deutlichen **Zunahme tropischer Wirbelstürme**, die dabei zwangsläufig größer, stärker und zerstörerischer werden.⁴¹⁵
- Die Fähigkeit zur Absorption von Treibhausgasen nimmt mit steigender Meerestemperatur ab – dies bedeutet (ab einem gewissen Punkt) für den Prozess der globalen Erwärmung eine **negative Rückkopplung mit selbstverstärkender Dynamik**.⁴¹⁶
- Höhere Durchschnittstemperaturen verändern den **Austausch und die Zirkulation** zwischen warmem Oberflächenwasser sowie tiefer liegenden (kälteren) Schichten. Dieser (bislang noch nicht voll erforschte) Effekt hat erheblichen Einfluss auf die Dynamik wichtiger Meeresströmungen und kann das **globale Klimasystem massiv verändern**.⁴¹⁷
- Eine weitere Komplikation liegt im beschleunigten **Abschmelzen der Eiskappen** an Nord- und Südpol, wodurch den Ozeanen große Mengen an Süßwasser zufließen – mit mutmaßlich starken Auswirkungen auf die Dynamik und Ausrichtung bisheriger Meeresströmungen.⁴¹⁸ (Vgl. dazu Abb. 51, S. 104).

Vor diesem Hintergrund gilt ganz generell: Die Ozeane sind das wohl **wichtigste Regulativ und Steuerungselement** des globalen Klimasystems – große Teile der globalen Wetterphänomene werden direkt oder indirekt von den Weltmeeren induziert oder beeinflusst!

- ▶ Diese Interdependenz wird auch als „**gekoppeltes Ozean-Atmosphären-Klimasystem**“ bezeichnet und steht für ein komplexes Zusammenspiel mit zahlreichen Rückkopplungen, denn: Die thermische Dynamik der Ozeane beeinflusst und moduliert das globale Windsystem, das wiederum die Meeresströmungen maßgeblich antreibt.⁴¹⁹

Abb. 50: Anhaltende Erwärmung der Ozeane – mit Schwerpunkt im Atlantik



Trend ozeanischer Erwärmung (1958-2023)
- obere 2.000 m -
W m⁻² -1,5 -1,0 -0,5 0,0 0,5 1,0 1,5

Quelle: Rahmstorf (2024, Tipping Point); Bildnachweis: Lijing Cheng

Eine strukturelle Veränderung dieses zentralen ozeanischen Elements, insbesondere durch anhaltende Erwärmung, hat also **zwangsläufig massiven Einfluss auf sämtliche Teilsysteme und deren oftmals sehr komplexe und zugleich subtile Interdependenzen**.

- ▶ Ein mehrjähriges Ausbleiben des Monsun in Asien könnte so – aus systemischer Perspektive – direkte Folge einer vielleicht nur marginalen Temperaturveränderung im Nordatlantik sein.

⁴¹⁵ Vgl. dazu etwa: Wetter.de (2024, „Superstürme“).

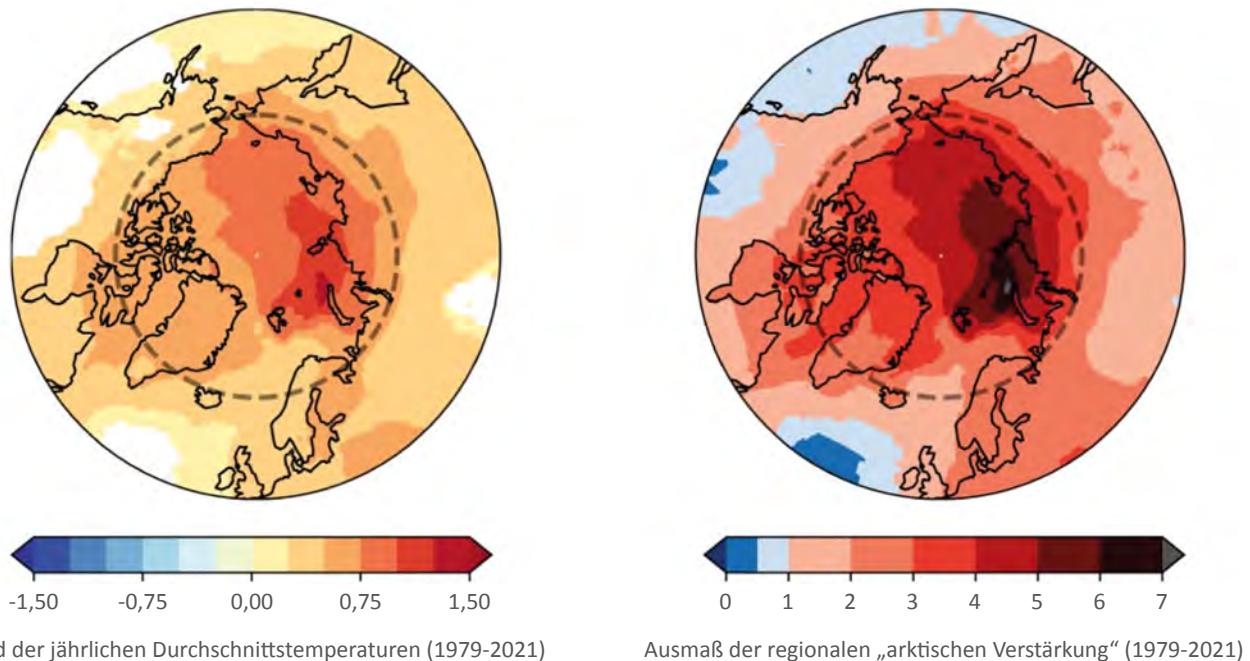
⁴¹⁶ „Eine **erhöhte Wassertemperatur verringert also das CO₂-Aufnahmepotential**. Folglich könnte der Ozean in Zukunft nicht in der Lage sein, seinen derzeitigen Anteil an den anthropogenen CO₂-Emissionen zu absorbieren, was die Auswirkungen des Klimawandels pro emittierter Tonne CO₂ verstärken würde.“; Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 9; (Hervorhebungen im Original). Analog auch: World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf).

⁴¹⁷ Vgl. dazu: Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 9-11. Ein wichtiger Teilaspekt ist hier die sogenannte Nordatlantische Umwälzzirkulation AMOC; vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 5.3.

⁴¹⁸ Vgl. zu diesem Aspekt bereits ausführlich: oben, Kap. 5.2 und Kap. 5.3.

⁴¹⁹ Vgl. dazu: Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 9.

Abb. 51: Massive Erwärmung der Arktis verstärkt ozeanische Veränderung



Quelle: Rantanen et al. (2022, Arctic)

Zentralität der Ozeane im Erdsystem

Die heutige Klimawissenschaft erfasst das Phänomen der ozeanischen Erwärmung bislang nicht als eigenständiges Kippelement und sieht dort folglich auch keinen kritischen Kippunkt – mit Ausnahme des AMOC-Phänomens.⁴²⁰

- Dieses „Ausblenden“ könnte sich jedoch in Zukunft als ernsthaftes Versäumnis erweisen, denn ganz offensichtlich spielen die Ozeane eine **entscheidende Rolle** im Erdsystem.⁴²¹

Die ozeanische Erwärmung hat **wichtige Grundeigenschaften**, die auch für anerkannte Klimakippelemente (mit zugehörigen Kippunkten) typisch sind, darunter zahlreiche Interdependenzen und Rückkopplungen mit anderen Teilsystemen, denn:

- „Diese Erwärmung führt einerseits zu einem Abschmelzen der Polkappen, andererseits zu einer **progressiv steigenden Frequenz und Intensität extremer Wetterereignisse** (Wirbelstürme, Starkregen, Hochwasser etc.).“⁴²²

Die zentralen Problemfelder der ozeanischen Erwärmung – ebenso wie deren Rückwirkungen auf andere Kern- und Steuerungselemente des globalen Klimasystems – benennt bereits das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (2010) in einem Standardwerk zur ozeanischen Klimaforschung:

- „Die in den Polargebieten aktuell steigenden Wassertemperaturen lassen die **Meereisbedeckung schrumpfen**. Gleichzeitig **versauern** die global ansteigenden Konzentrationen des Klimagases Kohlendioxid (CO₂) das Meerwasser. Diese Umweltveränderungen wirken auf die **Biologie der Polarmeere** ein, welche wiederum mit Prozessen im Gesamtsystem Erde in Wechselwirkung stehen.“⁴²³

⁴²⁰ Vgl. zum AMOC-Phänomen bereits ausführlich: oben, Kap. 5.3.

⁴²¹ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, vorhergehende Abschnitte, sowie nachfolgende Ausführungen.

⁴²² Rapp (2021, Progression), S. 9; (Hervorhebungen im Original); vgl. in diesem Sinne auch: Biber et al. (2022, Blue Economy); sowie grundsätzlich: IPCC (2019, Changing).

⁴²³ AWI (2010, Perspektive), S. 26; (Hervorhebungen durch Verfasser).

Auch der jüngste Bericht von WMO (2025), der unter anderem die Entwicklungen im Jahr 2024 kommentiert („... likely the first calendar year to be more than 1.5°C above the pre-industrial era (...) 2024 was the warmest year on record, with the globally averaged near-surface temperature estimated at 1.55°C ± 0.13°C above the 1850-1900 baseline“), weist klar darauf hin, dass die anhaltende Erwärmung der Ozeane **schwerwiegende und auf lange Zeit unumkehrbare Veränderungen** nach sich zieht:

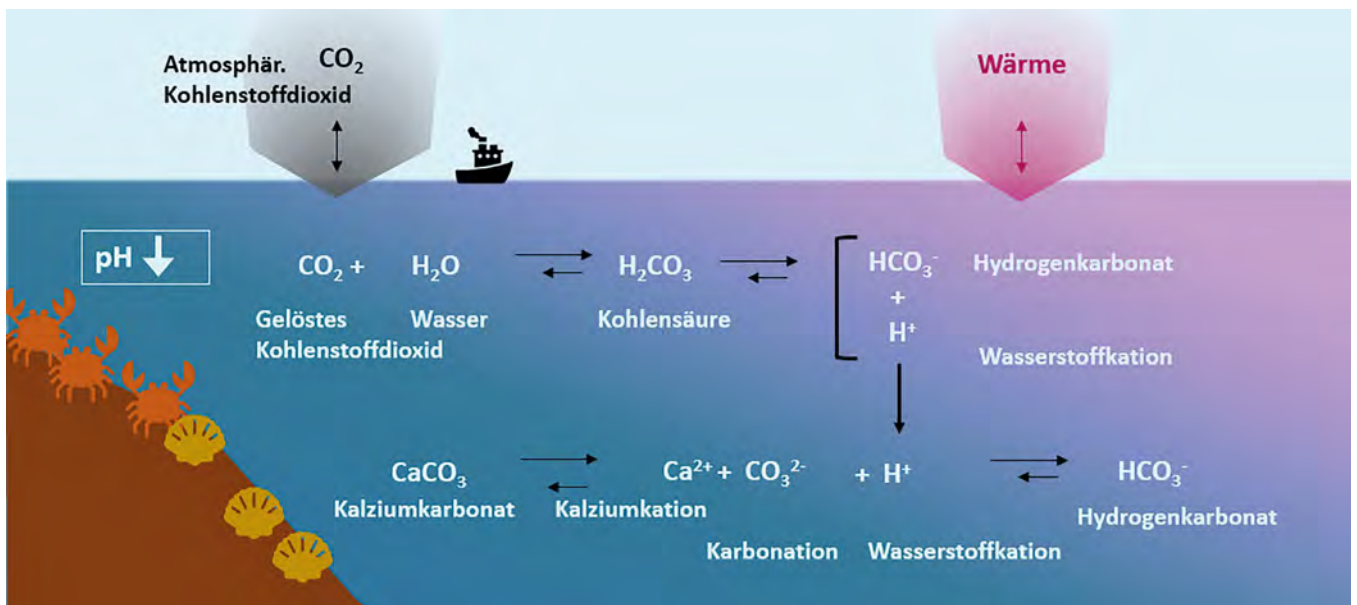
► „Sea-level rise and ocean warming irreversible for hundreds of years.“⁴²⁴

Ein wichtiger Schlüssel zur Problemlösung wäre eine schnelle und nachhaltige Reduktion von Treibhausgasemissionen, denn diese bedingen auch in den Ozeanen **systemische Rückkopplungen und komplexe Wechselwirkungen**:

► „Wenn die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre weiter steigt, wird das CO₂-Gefälle zwischen der Atmosphäre und dem Ozean zunehmen, was zu einer erhöhten CO₂-Aufnahme durch den Ozean führt“.⁴²⁵

► „Durch die verstärkte Lösung von CO₂ im Meerwasser nimmt der pH-Wert in den Meeren ab und die Meere versauern langsam.“⁴²⁶

Abb. 52: Das Problem der ozeanischen Versauerung



Quelle: Umweltbundesamt (2024, Ozeanversauerung)

“

Ocean acidification is a ticking timebomb ...

Steve Widdicombe, Ozeanforscher, in: Guardian (2025, Timebomb)

”

⁴²⁴ WMO (2025, Climate), (Zitate: Key Messages); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁴²⁵ Biber et al. (2022, Blue Economy), S. 9.

⁴²⁶ Umweltbundesamt (2024, Ozeanversauerung).

Das Problem der Ozeanischen Übersauerung

(vgl. dazu überblickartig Abb. 52, S. 105)

Schon heute bedingt der hohe CO₂-Gehalt, der in den Ozeanen gebunden und immer stärker konzentriert ist, eine zunehmende „**Übersauerung**“ der Weltmeere.⁴²⁷ Dies hat nicht nur extrem nachteilige Folgen für nahezu alle marinen Lebensformen und Ökosysteme, sondern reduziert – in einem **endogenen Rückkopplungsprozess** – auch die Kapazität der Ozeane zur weiteren Aufnahme von CO₂, was deren Eigenschaft als leistungsfähige „CO₂-Senken“ und effektive „CO₂-Puffer“ in Zukunft deutlich beeinträchtigt.⁴²⁸

Denn grundsätzlich gilt:

- ▶ „Durch die steigende Temperatur sinkt jedoch die CO₂-Aufnahmekapazität des Meerwassers und damit die Menge an bereits gelöstem CO₂.“⁴²⁹

Diese Grundproblematik wirkt sich in den **polaren Gewässern** besonders stark aus, denn:

- ▶ „Kältere Gewässer nehmen insgesamt mehr CO₂ aus der Atmosphäre auf als wärmere. Daher versauern die Meere in den Polargebieten schneller als im weltweiten Durchschnitt.“⁴³⁰

Auch hierüber wirken **weitere systemische Interdependenzen und Rückkopplungseffekte**, denn bekanntlich zählt die Arktis zu den Gebieten mit der weltweit höchsten relativen Erwärmung.⁴³¹

Neuere Studien bezeichnen das Problem der ozeanischen Versauerung als „*tickende Zeitbombe*“, da **wichtige Existenzgrenzen** ozeanischer Ökosysteme und Lebensformen vielfach bereits deutlich überschritten wurden:

- ▶ „Ocean acidification isn't just an environmental crisis – it's a **ticking timebomb** for marine ecosystems and coastal economies.“⁴³²

Aufgrund der zentralen Bedeutung ozeanischer Lebensräume für den planetaren Wirtschaftskreislauf und nicht zuletzt für die menschliche Nahrungskette ist das Phänomen der Meeresversauerung ein **sehr ernstes Problem**, das aber oftmals noch deutlich unterschätzt wird. Wegen ihrer potentiell gravierenden Folgewirkungen gilt die „ocean acidification“ auch als „**böser Zwilling**“ („evil twin“) der Erderwärmung.⁴³³

Korallensterben als wichtiger mariner Kipppunkt

Einer der wichtigsten direkten Folgeeffekte dieser ozeanischen Dynamik ist die sogenannte **Korallenbleiche**. Dieses Phänomen beruht auf der Abstoßung symbiotischer Algen durch Korallen, was diese schwächt und letztlich „verhungern“ lässt. Bei anhaltend adversen Umweltbedingungen – insbesondere hohen Wassertemperaturen – führt dies weltweit immer schneller zu einem **Absterben großer Korallenriffe** (vgl. dazu Abb. 53).⁴³⁴



Riff am Limit: Great Barrier Reef verliert massiv Korallen

WiWo (2025, Korallen)



⁴²⁷ Vgl. dazu ausführlich: World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf).

⁴²⁸ Vgl. dazu ausführlich: Umweltbundesamt (2024, Ozeanversauerung). Die zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Prozesse bei der CO₂-Anreicherung sowie der CO₂-Verteilung über drei elementare „ozeanische Kohlenstoffpumpen“ beschreibt ausführlich bereits: AWI (2010, Perspektive), S. 26-27.

⁴²⁹ Umweltbundesamt (2024, Ozeanversauerung).

⁴³⁰ Umweltbundesamt (2024, Ozeanversauerung).

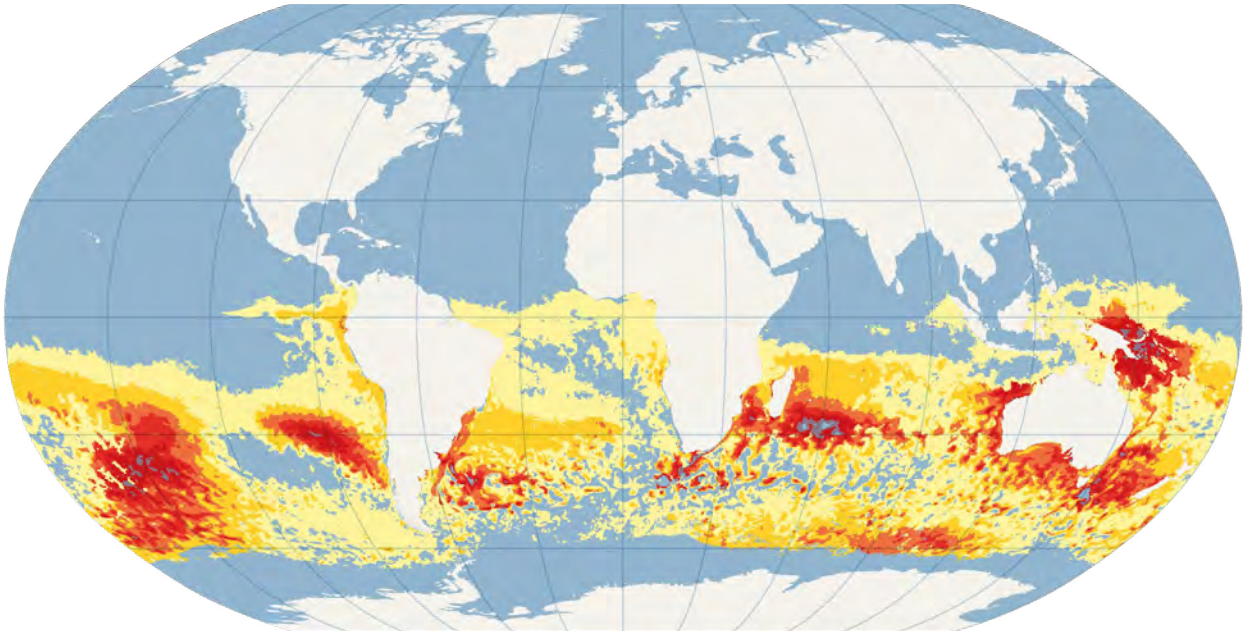
⁴³¹ Vgl. dazu etwa: International Science Council (2021, Arctic).

⁴³² Steve Widdicombe, Professor für Meeresforschung am Plymouth Marine Laboratory (PML); zitiert nach: Guardian (2025, Timebomb); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁴³³ Vgl. dazu ausführlich: Guardian (2025, „Evil Twin“); sowie: Umweltbundesamt (2024, Ozeanversauerung).

⁴³⁴ Vgl. zu den zugrundeliegenden Vorgängen sowie den Auslösern dieser Kettenreaktion ausführlich: ESKP (2017, Korallenbleiche); Deutsche Stiftung Meeresschutz (2021, Korallenbleiche); zum generellen Hintergrund vgl. auch: SZ (2025, Korallen).

Abb. 53: Globale Verbreitung und zunehmende Gefährdung von Korallenriffen



Rot = existenzieller Gefährdungsgrad

Quelle: SZ (2025, Korallen)

Nach heutigem Stand der Forschung wird das **Korallensterben** sowohl von der ozeanischen Erwärmung als auch der zunehmenden Übersauerung der Meere getrieben. Es ist damit ein weiteres Musterbeispiel für das Problem **verbundener und interdependenter Kausalitäten**, das im globalen Klimasystem sehr häufig eine äußerst zentrale – aber oftmals unterschätzte – Rolle spielt.⁴³⁵

Aufgrund der Stärke der ozeanischen Erwärmung in den tropischen und subtropischen Breitengraden betrifft das Korallensterben aktuell vorrangig die großen **Korallenriffe im Pazifik**, darunter das *Great Barrier Reef* vor der Ostküste Australiens.⁴³⁶

- Gemäß einer satellitengestützten Auswertung waren 2024 **bereits 54%** der weltweiten Korallenriffe hochgradig existenzgefährdet.⁴³⁷

- Neuere Schätzungen gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2050 weltweit bereits **rund 90% der Korallenriffe abgestorben** sein könnten.⁴³⁸

“

Geht das Korallensterben in diesem Tempo weiter, werden in weniger als 30 Jahren bis zu 90 Prozent aller Korallen verschwunden sein.

DW (2023, Korallensterben)

”

⁴³⁵ Vgl. dazu grundlegend bereits: oben, Kap. 4.

⁴³⁶ Vgl. dazu sehr aktuell: WiWo (2025, Korallen); analog auch: ntv (2025, Korallenbleiche).

⁴³⁷ Vgl. dazu: Spektrum (2024, Korallenbleiche), unter Verweis auf Daten der US-Behörde NAOO.

⁴³⁸ Vgl. dazu: DW (2023, Korallensterben); analog auch: MPG (2024, Massenbleiche); sowie: PIK (2025, Erdsystem). Vgl. dazu auch grundsätzlich: Pearce-Kelly et al. (2025, Coral Reefs).

Ausschlaggebend dafür sind die derzeitigen Entwicklungen im Zuge der globalen Erwärmung: Bereits der spezielle Bericht des *Weltklimarates* (2018) verweist sehr deutlich auf die hohe thermische Sensitivität der Korallenriffe, die bereits bei einer **Erwärmung von 1,5°C extrem gefährdet** und bei 2°C massiv vom Aussterben bedroht sind:

- ▶ „Coral reefs would decline by 70-90 percent with global warming of 1.5°C, whereas virtually all (> 99 percent) would be lost with 2°C.“⁴³⁹

In diesem Sinne konstatiert – und präzisiert – auch die *Max-Planck-Gesellschaft, MPG* (2024):

- ▶ „Bei einem Temperaturanstieg von 1,5 Grad werden voraussichtlich 70 bis 90 Prozent der Riffe verschwinden. Bei einem Anstieg um zwei Grad, wie er 2050 erreicht werden könnte, werden fast alle Riffe der Erde absterben.“⁴⁴⁰

Nach Aussage von *Timothy Lenton*, einem der weltweit führenden Klimaforscher, konstituiert diese enorme Sensitivität der Korallenriffe einen weiteren **wichtigen Kipppunkt** innerhalb des Erdsystems, denn es herrscht „... **allgemeine Übereinstimmung in Bezug auf den Status von Korallenriffen als Kipppunkt** sowie darüber, dass das *Great Barrier Reef* und andere tropische Barriereriffe in den vergangenen Jahren regelmäßig eine Massenbleiche erleben.“⁴⁴¹

Demnach würde selbst eine Begrenzung der Erderwärmung auf 2°C ein **umfassendes Absterben der Korallenriffe** weder aufhalten noch ihre spätere Regeneration ermöglichen. Unter Berücksichtigung aktueller Tendenzen ist davon auszugehen, dass einige der weltweiten Korallenriffe ihren Kipppunkt **bereits überschritten** haben und in ihrer Gesamtheit nicht mehr überlebensfähig sind:

- ▶ „Grundsätzlich herrscht allgemeiner Konsens dahingehend, dass der **Kipppunkt in den nächsten zehn Jahren erreicht wird** und dass die Korallenriffe in den niedrigen Breiten-graden dann nicht mehr zu retten sein werden.“⁴⁴²

Die Bedeutung der Korallenriffe für das Erdsystem ist äußerst vielfältig und wird möglicherweise selbst heute noch unterschätzt. Ihre Funktion als wichtiger Lebensraum und komplexes Biotop für eine Vielzahl mariner Lebensformen leistet einen großen Beitrag zur planetaren **Biodiversität**. Darüber hinaus bieten sie ozeanischen Ökosystemen – darunter Inseln und viele Küstengebiete – wichtige **Existenzgrundlagen** sowie Schutz vor Überflutung und extremen Wetterereignissen.⁴⁴³

Zum derzeitigen Zustand *des Great Barrier Reef* hat das *Australian Institute of Marine Science (AIMS)* im Sommer 2025 einen aktuellen Bericht vorgelegt, der bisherige Befunde und Befürchtungen vollumfänglich bestätigt.⁴⁴⁴ Über diesen Link geht es direkt zum entsprechenden *AIMS Report 2024/25*:



⁴³⁹ IPCC (2018, Summary). In diesem Sinne auch: PIK (2025, Erdsystem), („Korallenriffe“).

⁴⁴⁰ MPG (2024, Massenbleiche).

⁴⁴¹ *Timothy Lenton*, Professor an der *University of Exeter*, zitiert nach: Germanwatch (2023, Korallenriffe); [Autoren: *Conor Purcell, Michael Keary*]; (Hervorhebungen im Original).

⁴⁴² Germanwatch (2023, Korallenriffe); (unter Verweis auf *Timothy Lenton*); (Hervorhebungen durch Verfasser). Neuere Analysen gehen davon aus, dass der entsprechende Kipppunkt bereits erreicht wurde und in den nächsten Jahren wohl unwiderruflich überschritten wird; vgl. dazu etwa: PIK (2025, Erdsystem), („Korallenriffe“); sowie insbesondere: Pearce-Kelly (2025, Coral Reefs).

⁴⁴³ Vgl. DW (2023, Korallensterben); Germanwatch (2023, Korallenriffe); sowie: PIK (2025, Erdsystem), („Korallenriffe“). Zu diesen Zusammenhängen hat das *FERI Cognitive Finance Institute* bereits zwei ausführliche Studien veröffentlicht; vgl.: Biber et al. (2022, Blue Economy); Biber et al. (2024, Biodiversität).

⁴⁴⁴ Vgl. dazu: AIMS (2025, Reef).

Zu diesen wichtigen Eigenschaften erklärt ergänzend auch PIK (2025):

- ▶ „Tropische und subtropische Korallenriffe sind eines der **Ökosysteme mit der höchsten Biodiversität** auf der Erde. Sie haben einen enormen Einfluss auf die Nahrungskette im Meer, den Nähr- und Kohlenstoffkreislauf im Ozean, und sind entscheidend für die Lebensbedingungen von Millionen Menschen weltweit. Sie bieten zum Beispiel Küstenschutz und sind wichtig für die Tourismuswirtschaft.“⁴⁴⁵



Korallenriffe werden oft als Regenwälder des Meeres bezeichnet

Germanwatch (2023, Korallenriffe)



Inwieweit das beschleunigte Korallensterben – als wichtiger **partieller Kippunkt** – auch andere Teilsysteme und Kippelemente des globalen Klimasystems beeinflusst und dort möglicherweise direkte oder beschleunigte Rückkopplungseffekte bewirken kann, ist derzeit noch umstritten.⁴⁴⁶

Dennoch gibt der **globale Verfall der Korallenriffe** ein bedrohliches Signal, das nicht ignoriert werden sollte; plakativ erklärt dazu die Umweltorganisation *Germanwatch* (2023):

- ▶ „Das rasante Sterben zahlreicher Riffe in den vergangenen zehn Jahren ist eines der deutlichsten Anzeichen dafür, dass die Dinge gewaltig schiefgehen.“⁴⁴⁷

Gesamtbedeutung und Wirkungsebenen ozeanischer Systeme

Vor diesem Hintergrund wird klar: Die Situation der Weltmeere ist ganz offensichtlich ein **zentraler Einflussfaktor** für das globale Klimasystem!

Die Ozeane wirken als **mächtiges Steuerungselement** für eine Vielzahl äußerst relevanter Teilprozesse des globalen Klimageschehens – und direkt und indirekt auch für die biologische Vielfalt und die Lebensbedingungen großer Teile der Weltbevölkerung.

Sie sind zugleich Auslöser **komplexer Verstärkungs- und Rückkopplungseffekte**, die direkt oder indirekt auf andere Teilsysteme einwirken und damit andere Kippelemente – insbesondere das **arktische Meereis** sowie die **polaren Eisschilde** – näher an ihre jeweiligen Kippunkte heranführen.

- ▶ Aus dieser Perspektive sollte das Phänomen der ozeanischen Erwärmung ähnlich intensiv – und ebenso systemisch – betrachtet werden, wie dies bei anderen progressiven Dynamiken und anerkannten Kippelementen bereits der Fall ist!

Da wesentliche Teile der skizzierten Zusammenhänge aber noch nicht abschließend erforscht oder verlässlich modelliert sind, lassen sich **kritische Grenzwerte** für ein mögliches „Umkippen“ der ozeanischen Sphäre – einschließlich damit verbundener oder nachgelagerter Systeme – vorerst nicht klar bestimmen.⁴⁴⁸

- ▶ Dennoch zeigt ein Blick auf die vielfältigen und oftmals hochkomplexen **Interdependenzen**, verstärkt durch sehr dynamische **Rückkopplungseffekte**, dass eine fortschreitende Erwärmung der Ozeane keine wünschenswerte Perspektive sein kann.⁴⁴⁹

⁴⁴⁵ PIK (2025, Erdsystem), („Korallenriffe“).

⁴⁴⁶ Vgl. dazu etwa: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); speziell S. 146. Korallenriffe werden dort als wichtiges Kippelement angeführt, jedoch ohne direkte Rückkopplung auf die Dynamik der globalen Erwärmung.

⁴⁴⁷ Germanwatch (2023, Korallenriffe).

⁴⁴⁸ Die Tatsache, dass viele wichtige Steuerungselemente des weltweiten Klimasystems extrem eng verknüpft sind, gleichzeitig aber auch in zentraler Weise vom Zustand der Ozeane abhängen, lässt hier allerdings auf extrem sensible und zugleich immer enger werdende Schwellenwerte für „kritische“ Kippunkte schließen.

⁴⁴⁹ Hier sei auf die kurze Zusammenstellung verwiesen (oben im Kapitel), aber auch auf alle weiteren Ausführungen im Rahmen der vorliegenden Analyse.

Daraus folgt:

Die weitere Erforschung der marinen Dynamik – mit Phänomenen wie fortschreitender Erwärmung, massiver CO₂-Anreicherung, gravierender Übersauerung, Konzentration thermischer Energie sowie Störungen der thermohalinen Zirkulation – sollte in den Klimawissenschaften künftig deutlich höher priorisiert werden!

Dabei sollte ein integrierter und stark **systemorientierter Ansatz** verfolgt werden, der den komplexen Interdependenzen der ozeanischen Teilsysteme explizit Rechnung trägt – einschließlich **endogener Rückkopplungen und Rückwirkungen** in andere Bereiche des Erdsystems.

Nichthandeln und Problemignoranz hätten eine weitere **progressive Verschärfung** der ozeanischen Erwärmung zur Folge – mit allen bereits bekannten negativen Konsequenzen sowie bislang noch unerforschten Folgewirkungen auch für andere kritische Bereiche des globalen Klimasystems.⁴⁵⁰

Direkte und indirekte Interdependenzen mit anderen Kippelementen und Kippdynamiken:

Starke direkte Auswirkung der **Ozeanischen Erwärmung** auf Biodiversität, planetare Windsysteme, Niederschlagsmuster und Extremwetterereignisse (▷ Wirbelstürme).

- ▷ Direkte Auswirkung auf Prozess des **globalen Korallensterbens** (Ursache & Treiber).
- ▷ Verstärkung der **polaren Eisschmelze** und damit auch Beitrag zu Abschwächung der **AMOC**.

Unklare indirekte Auswirkungen auf globale Klimaphänomene (▷ *El Niño*; *La Niña*).

Insgesamt: Klare Interdependenz/Verstärkung/Rückkopplung mit **Erderwärmung**.

5.6 Auftauen von Permafrostböden und Methanfreisetzung

Die weltweiten **Permafrostböden** sind ebenfalls Teil der globalen Kryosphäre. Sie bestehen aus Bodenflächen, die aufgrund ihrer Nähe zu den globalen Kältepolen oftmals seit Tausenden von Jahren in tiefgefrorenem Zustand sind. In wissenschaftlicher Abgrenzung werden Permafrostböden definiert „... als Untergrund (einschließlich Eis), der über mindestens zwei aufeinander folgende Jahre ständig unter 0°C bleibt.“⁴⁵¹

Die Permafrostböden liegen überwiegend auf der **Nordhalbkugel**, wo sie **rund 25% der gesamten Landfläche** bedecken. Sie erstrecken sich dort über weite Regionen, insbesondere in Grönland, Russland (Sibirien) sowie auf dem Nordamerikanischen Kontinent (Kanada und Alaska). Während in Grönland rund 99% des Landes in der Permafrostzone liegen, sind dies für Alaska immerhin noch 80% und für Russland und Kanada zwischen 40 und 50%.⁴⁵²

- ▶ Auf der Südhalbkugel finden sich (außerhalb von Hochgebirgsregionen der Anden) lediglich vereinzelt Permafrostböden, insbesondere auf einigen subantarktischen Inseln.⁴⁵³
- ▶ Weltweit gelten **rund 17-20% der Erdoberfläche** als Permafrostregionen.⁴⁵⁴
- ▶ Immerhin **rund 34% der globalen Küstengebiete** entfallen auf Permafrostzonen.⁴⁵⁵

⁴⁵⁰ Vgl. zu den genannten Zusammenhängen und Interdependenzen bereits: oben, vorhergehende Abschnitte.

⁴⁵¹ AWI (2010, Perspektive), S. 20.

⁴⁵² Vgl. dazu: Science (2023, Permafrost); ergänzend auch: Ipb (2021, Permafrostböden).

⁴⁵³ Vgl. dazu etwa: Science (2023, Permafrost).

⁴⁵⁴ Vgl. dazu: Ipb (2021, Permafrostböden). ESKP (2021, Zusammenhang) nennt einen Wert von 25%; andere Angaben liegen hingegen nur bei rund 10%; vgl. dazu etwa: Abbott et al. (2022, Permafrost), S. 2.

⁴⁵⁵ Vgl. dazu: AWI (2010, Perspektive), S. 20; dort auch ergänzend: „Das AWI leitet seit mehr als zehn Jahren das internationale Projekt ‚Arctic Coastal Dynamics‘, das wesentlich zur Charakterisierung der Prozesse, die an den Küstenbereichen des Arktischen Ozeans ablaufen, sowie zur Quantifizierung des Küstenabtrages beiträgt.“

Die größten Areale mit anhaltendem Permafrost sind typischerweise in der letzten Eiszeit entstanden und damit über 100.000 Jahre alt. Der Permafrost reicht in den betreffenden Regionen meist weit in den Untergrund, oftmals sogar bis in Tiefen von mehr als 1.000 Metern.⁴⁵⁶

- ▶ Abb. 54 verdeutlicht die exponierte Lage, Ausdehnung und Verteilung der weltweit bedeutendsten Permafrostgebiete, konzentriert auf die **arktischen Polarregionen** in Russland, Nordamerika/Kanada sowie Teilen Nordeuropas.⁴⁵⁷

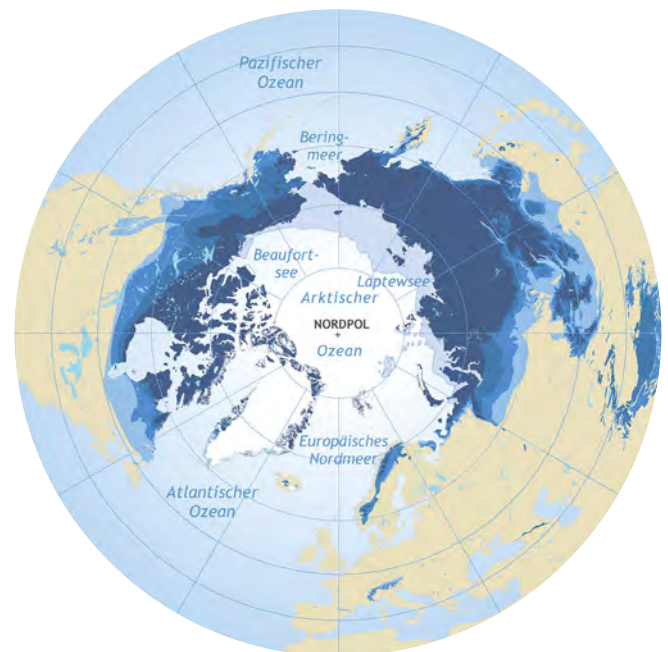
Permafrostboden als planetarische Kohlenstoffspeicher

Die besondere Bedeutung der Permafrostböden liegt in ihrer Eigenschaft als riesige **planetarische Kohlenstoffspeicher**. Denn: In den Permafrostarealen sind enorme Mengen an organischen Kohlenstoffverbindungen „eingefroren“. Schätzungen gehen davon aus, dass dieser „verdeckte“ Bestand etwa **2.500 bis 3.000 Gigatonnen** (2,5 bis 3 Bio. t) Kohlenstoff entspricht.⁴⁵⁸

Dies ist aus globaler Perspektive eine äußerst relevante Quantität:

- ▶ „Zum Vergleich: Die gesamte Atmosphäre enthält derzeit rund **800 Gigatonnen Kohlenstoff**.“⁴⁵⁹
- ▶ „Damit repräsentieren die Permafrostregionen rund **ein Drittel aller globaler Kohlenstoffspeicher** und sind die **mit Abstand größten Kohlenstoffspeicher der Welt**.“⁴⁶⁰
- ▶ „Permafrostböden enthalten also so viel Kohlenstoff wie **120 bis 150 Jahre** der anthropogenen CO₂-Emissionen auf aktuellem Niveau.“⁴⁶¹

Abb. 54: Die wichtigsten Permafrostregionen der Nordhalbkugel



- Kontinuierlicher Permafrost
- Diskontinuierlicher Permafrost
- Sporadischer Permafrost
- Vereinzelt Permafrost
- Submariner Permafrost

Quelle: ESKP (2021, Permafrostregionen)

Die Einlagerung dieser enormen Kohlenstoffmengen geht auf die erdgeschichtlichen Phasen vor der letzten Eiszeit zurück. Vor rund 400.000 Jahren herrschte in den heutigen Permafrostregionen ein völlig anderes Klima, das üppige Vegetation und reichhaltigen Tierbestand begünstigte.⁴⁶²

⁴⁵⁶ Vgl. dazu überblickartig: Ipb (2021, Permafrostböden). Umweltbundesamt (2006, Permafrost) erklärt dazu: „Die Dicke des Permafrostes variiert insgesamt zwischen einigen bis zu mehreren Hundert Metern.“ Zu einer ausführlichen Darstellung polarer Strukturen, einschließlich der Permafrost-/Emissions-Problematik, vgl. das Standardwerk von: AWI (2010, Perspektive); weiterführend auch: World Ocean Review (2019, Polarregionen).

⁴⁵⁷ Vgl. dazu: ESKP (2021, Permafrostregionen). Für eine überblickartige Darstellung der wichtigsten Fakten dazu vgl. auch bereits: AWI (2015, Permafrost).

⁴⁵⁸ Vgl. dazu: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 25, unter Verweis auf: Abbott et al. (2022, Permafrost). Andere Schätzungen vermuten etwas tiefere Werte; so nennt etwa die zur Helmholtz-Gesellschaft zugehörige Earth System Knowledge Plattform (ESKP) Zahlen von rund 1,3-1,6 Bio. t; vgl. dazu: ESKP (2021, Permafrost).

⁴⁵⁹ ESKP (2021, Permafrost).

⁴⁶⁰ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 25.

⁴⁶¹ Science Media Center (2025, Permafrost); Aussage von Thomas Kleinen, wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Wechselwirkung Klima-Biogeosphäre, Abteilung Land im Erdsystem, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.

⁴⁶² Vgl. dazu überblickartig etwa: Bild der Wissenschaft (2023, Eisfrei).

Beim Absterben dieser früheren Flora und Fauna wurden deren Überreste – zu einem hohen Anteil bestehend aus organischen Kohlenstoffverbindungen – als Torf in die jeweiligen Böden „eingelagert“ und in der nachfolgenden Eiszeit „tiefgefroren“.⁴⁶³

- ▶ Durch die extrem niedrigen Temperaturen und den Sauerstoffmangel im Permafrost wurde dieses organische Material über lange Zeiträume konserviert: **„Permafrostböden der arktischen Tundra und Taiga sind deshalb Kohlenstoffsenken.“**⁴⁶⁴

Diese seit Jahrtausenden stabile Konstellation verändert sich jedoch derzeit – mit massiven Folgen! Dahinter steht ein **Prozess von sehr grundsätzlicher Bedeutung**. Wie Klimaforscher zuletzt mit zunehmender Dringlichkeit betonen, besteht ein intrinsischer und sehr direkter **„Zusammenhang zwischen Klimawandel und Permafrost“**:

- ▶ *„Wenn der Permafrost taut, werden (...) Mikroorganismen aktiv und verwandeln im Boden gespeicherte Kohlenstoffverbindungen in Methan, Wasserdampf und Kohlendioxid, die den Treibhauseffekt verstärken.“*⁴⁶⁵



Erderwärmung gefährdet die Permafrost-Regionen und damit das globale Klimasystem

AWI (2010, Perspektive)



Rapide Erwärmung wichtiger Permafrostregionen

Vor diesem Hintergrund repräsentieren die weltweiten Permafrostböden derzeit ein – möglicherweise entscheidendes – Risiko für den weiteren Verlauf des Klimawandels, denn: Im Zuge der globalen Erwärmung steigen auch die Temperaturen in den Permafrostregionen. Besonders kritisch ist hier die **überproportionale Erwärmung** auf der Nordhalbkugel, vor allem in der Arktis:

- ▶ *„Messungen bestätigen, dass in den letzten Jahrzehnten die mittlere Lufttemperatur der Arktis **fast doppelt so stark angestiegen** ist wie die globale Mitteltemperatur.“*⁴⁶⁶

Neuere Messwerte und satellitengestützte Beobachtungen deuten inzwischen sogar auf eine bis zu **vierfach schnellere Erwärmung** der Arktis relativ zum globalen Durchschnitt!⁴⁶⁷

- ▶ Demzufolge hat sich die Durchschnittstemperatur in der Arktis seit 1979 mit einer Rate von rund 0,75°C pro Dekade erhöht, insgesamt also um **mehr als 3°C**.⁴⁶⁸

Dieser für viele Klimawissenschaftler anfangs „überraschende“ Befund deutet auf erhebliche Unschärfen oder unzutreffende Annahmen in einer Vielzahl bisheriger Klimamodelle hin. Das Ergebnis verschärft bisherige Szenarien – nicht nur zur Dynamik der arktischen Eisschmelze, sondern auch zur weiteren **Entwicklung wichtiger Permafrostregionen**.⁴⁶⁹

⁴⁶³ Letztlich ist dies ein ähnlicher Prozess wie bei den riesigen Erdöl- und Erdgaslagerstätten, die ebenfalls beim Verfall und der nachfolgenden Zersetzung erdgeschichtlich früher Flora und Fauna gebildet wurden.

⁴⁶⁴ Umweltbundesamt (2006, Permafrost); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁴⁶⁵ ESKP (2021, Zusammenhang).

⁴⁶⁶ Ipb (2021, Permafrostböden); (Hervorhebungen durch Verfasser). Diese Werte nennt auch noch der *„Sonderbericht Klimawandel und Landsysteme“* von 2019 des Weltklimarates; vgl. dazu: IPCC (2019, Climate); (insbesondere S. 564).

⁴⁶⁷ Vgl. dazu etwa: Spiegel (2022, Arktis). Analog auch: Deutschlandfunk Kultur (2022, Alaska). Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 5.2; sowie explizit die Untersuchung von: Rantanen et al. (2022, Arctic), mit der Kernaussage: *„The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979.“*

⁴⁶⁸ Vgl. dazu ausführlich: Spiegel (2022, Arktis); sowie: Rantanen et al. (2022, Arctic).

⁴⁶⁹ Vgl. zur arktischen Eisschmelze und den entsprechenden Folgewirkungen ausführlich bereits: oben, Kap. 5.2.

Speziell **Sibirien** und **Alaska** haben sich in den letzten Jahrzehnten signifikant erwärmt. Diverse Messungen zeigen, dass der Grad der Erwärmung dort in den letzten 50 Jahren **etwa 3-4°C** beträgt – in einzelnen Jahren wurden aber **auch bis zu 10°C** gegenüber langfristigen Mittelwerten gemessen!⁴⁷⁰

- ▶ Als Folge davon stehen zwei der größten und bedeutendsten Kohlenstoffreservoirs der Welt – zumindest in Teilen – am Beginn einer **anhaltenden Auftauphase!**

Zusätzlich zu den **indirekten** – aber extrem relevanten – Auswirkungen auf die Dynamik der globalen Erwärmung hat das mögliche Auftauen großer Permafrostareale in den jeweiligen Regionen auch noch sehr **direkte Konsequenzen**. Diese liegen primär in einer zunehmenden **Instabilität** der Böden. Deshalb könnten dort wichtigen Teilen der Infrastruktur, insbesondere Gebäuden, Straßen oder anderen Installationen, enorme Schäden drohen – bis hin zur völligen Zerstörung. So erklärt bereits AWI (2010):

- ▶ „Die aktuelle Erwärmung bedroht mithin die gesamte auf Permafrost gebaute Infrastruktur.“⁴⁷¹

Explizit warnt diesbezüglich auch *Global Tipping Points Report* (2023):

- ▶ „Permafrost thawing already damages property and infrastructure; 70% of current infrastructure in permafrost regions is in areas with high potential for thaw by 2050.“⁴⁷²

Abb. 55 (S. 114) verdeutlicht schematisch die beim Auftauen der Permafrostböden resultierenden komplexen Prozesse sowie deren absehbare Konsequenzen und Rückkopplungseffekte.⁴⁷³



Bisherige Klimamodelle gingen von einem deutlich langsameren Temperaturanstieg aus.

Spiegel (2022, Arktis)



Wie neuere Untersuchungen zeigen, entwickeln auftauende Permafrostböden auch eine sehr **spezielle Eigendynamik**, die durch „Aufplatzen“ von „Methankratern“ (ausgelöst durch einen massiven Austritt von Methangas) sowie die Ausformung charakteristischer Strukturen und „Abflusskanäle“ geprägt ist. Offensichtlich bilden diese Strukturen „... neue Kanäle für das Schmelzwasser, als die Schnee- und Eisflächen in den vergangenen Jahrzehnten im Sommer zu tauen begannen.“⁴⁷⁴

- ▶ Derartige eigendynamische „Umformungen“ großer Areale leisten den schon jetzt akuten Erosionsprozessen noch Vorschub – was den Zerfall der Permafrostböden weiter verstärkt und beschleunigt: „**Tauender Permafrost beschleunigt Erosion.**“⁴⁷⁵

In einem Video mit Luftaufnahmen, gefilmt im Norden von Kanada, zeigen sich diese vom Klimawandel ausgelösten Umformungen sehr deutlich, ebenso wie die zunehmende Kanalbildung. Hier geht's direkt zum Video der arktischen Expedition:



⁴⁷⁰ Vgl. dazu mit zahlreichen weiteren Nachweisen: Perplexity (2025, Arktis). In Sibirien haben Wissenschaftler der russischen *Universität Tomsk* festgestellt, „... dass die durchschnittliche Jahrestemperatur in Sibirien in den vergangenen 50 Jahren um fast vier Grad stieg.“ [Zitat: ntv (2020, CO₂-Zeitbombe)]. In den Jahren 2020 und 2021 wurden in einzelnen Teilen Sibiriens sogar Spitzentemperaturen von knapp 40°C gemessen! Vgl. dazu etwa: Tagesschau (2021, Hitzerekord).

⁴⁷¹ AWI (2010, Perspektive), S. 20.

⁴⁷² University of Oxford, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 177.

⁴⁷³ Vgl. dazu: ESKP (2021, Permafrost); ESKP (2021, Permafrostregionen); sowie: Bildungsserver Hamburg (2019, Tauen). Grundlegend dazu auch bereits: AWI (2010, Perspektiven), S. 20-21.

⁴⁷⁴ Vgl. dazu ausführlich: Welt der Physik (2023, Permafrost); ergänzend auch: Chartrand et al. (2023, High Arctic).

⁴⁷⁵ Welt der Physik (2023, Permafrost).

Abb. 55: Komplexe Abläufe und Folgen des Auftauens von Permafrostböden



Quelle: Bildungsserver Hamburg (2019, Tauen)

Drohende Freisetzung von Treibhausgasen

Mit steigenden Temperaturen in den arktischen Permafrostregionen zeichnet sich ein Szenario ab, in dem erhebliche Teile der bislang „tiefgefrorenen“ Böden auftauen werden.⁴⁷⁶ Für diesen Prozess sind schon heute sehr klare und zunehmend deutliche Anzeichen erkennbar:

- ▶ „In den meisten Regionen der Arktis schreitet die Erwärmung im Winter stärker voran als im Sommer. Insgesamt zeigt sich für die Arktis ein **eindeutiger Erwärmungstrend**.“⁴⁷⁷
- ▶ „Da die arktischen Winter wärmer und die Sommer länger werden, tauen inzwischen immer **tiefere Erdschichten** auf.“⁴⁷⁸

Durch diesen Prozess schrumpfen bisherige Permafrostzonen in großem Umfang, während sich gleichzeitig große Areale in auftauende Sumpflandschaften verwandeln. Verbleibende (deutlich reduzierte) Permafrost-Restareale verlagern sich dabei immer mehr nach Norden, in Richtung des arktischen Kältepol. Dazu erklärt die *Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren*:

- ▶ „Vor allem im europäischen Teil der **russischen Arktis** zieht sich der Permafrost stark zurück. Im Zeitraum von 1995 bis 2005 hat sich die südliche Grenze der Regionen mit kontinuierlichem Permafrost um bis zu 50 Kilometer nach Norden zurückgezogen. In Gebieten mit diskontinuierlichem Permafrost betrug der Rückzug Richtung Norden bis zu 80 Kilometer.“⁴⁷⁹



Permafrost tiefer aufgetaut als gedacht.

ESKP (2017, Permafrost)



⁴⁷⁶ Vgl. dazu etwa ESKP (2021, Permafrost): „Dass der Permafrost vielerorts taut und zerfällt, belegen Aufzeichnungen in Bohrlöchern und andere Messungen in der globalen Permafrost-Datenbank GTN-P.“ Zu den grundlegenden Zusammenhängen und Wirkungsketten ausführlich bereits: AWI (2010, Perspektive).

⁴⁷⁷ Umweltbundesamt (2006, Permafrost); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁴⁷⁸ ntv (2020, CO₂-Zeitbombe); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁴⁷⁹ ESKP (2021, Permafrost); (Hervorhebungen durch Verfasser).

Aus Sicht der Klimawissenschaft sind dabei **drei Faktoren** entscheidend:

- Beim Auftauen von Permafrostböden droht ein Großteil der bislang im Boden „eingefrorenen“ Kohlenstoffe unwiderruflich **freigesetzt zu werden**.
- Von zentraler Bedeutung ist dabei die **Zusammensetzung**, die nicht nur CO₂ umfasst, sondern zu erheblichen Anteilen auch das noch schädlichere **Methan**.
- Eine weitere wichtige Rolle spielen hierbei die **Geschwindigkeit** sowie die **physikalische und zeitliche Dynamik** des Auftauens.

Allgemein gilt eine **Erderwärmung um rund 1,5°C** – so wie derzeit bereits gegeben – als Ausgangspunkt für ein großflächiges Auftauen bestehender Permafrostareale.⁴⁸⁰ Entsprechend warnt auch *Umweltbundesamt* (2024):

- ▶ „**Abruptes Auftauen** könnte bereits bei einer **Erderwärmung von 1,5°C (1-2,3°C)** ausgelöst werden und würde **weitere lokale Kippdynamiken**, wie fortlaufendes Tauen und die weitere Freisetzung von Treibhausgasen, auf subkontinentaler Ebene auslösen.“⁴⁸¹

Da dieser Prozess offensichtlich bereits eingesetzt hat, sind weitere Folgewirkungen klar absehbar:

- ▶ Dazu zählt in erster Linie die allmähliche – oder sogar beschleunigte – **Freisetzung** der im Boden gespeicherten Kohlenstoffverbindungen, insbesondere CO₂ und CH₄.
- ▶ Deshalb gilt das Gebiet des arktischen Permafrosts auch als tickende „**CO₂-Zeitbombe**“.⁴⁸²

Bereits 2011 wird dazu in einer entsprechenden Studie festgestellt:

- ▶ „**Permafrost gibt fünf Mal mehr Treibhausgase ab als gedacht**.“⁴⁸³

Die Erwartung, dass durch das Auftauen arktischer Permafrostböden klimaschädliche Treibhausgase **in erheblichem Umfang** freigesetzt werden, ist physikalisch zwingend und in der Klimawissenschaft unumstritten. Die entsprechenden Effekte für das globale Klima wären gravierend und würden zweifellos den schon heute spürbaren **Treibhauseffekt massiv verstärken**.⁴⁸⁴

- ▶ Schätzungen gehen davon aus, dass durch ein anhaltendes Auftauen der „**arktischen Kohlenstoffschenke**“ innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne so große Mengen (zusätzlicher) Treibhausgase freigesetzt würden, wie derzeit **weltweit pro Jahr emittiert** werden.⁴⁸⁵
- ▶ Schon heute entspricht der **Freisetzungseffekt der Permafrostregion** den jährlichen Treibhausgasemissionen eines großen Industrielandes wie Japan.⁴⁸⁶



Permafrost gibt fünf Mal mehr Treibhausgase ab als gedacht.

scinexx.de (2011, Permafrost)



⁴⁸⁰ Vgl. dazu etwa: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 26; analog auch IPCC (2019, Climate), S. 684: „Approximately, 21-37% of Arctic permafrost is projected to thaw under a 1.5°C of warming.“; dazu explizit auch: PIK (2025, Erdsystem); („Permafrostböden“): „Der Temperaturschwellenwert für ein Kippen wird auf 1,5°C (1-2,3°C) geschätzt, mit einer Prozessdauer von 200 Jahren (100-300 Jahre).“ Vgl. dazu grundsätzlich auch: Nitzbon et al. (2024, Permafrost-Thaw).

⁴⁸¹ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 26.

⁴⁸² ntv (2020, CO₂-Zeitbombe).

⁴⁸³ scinexx.de (2011, Permafrost).

⁴⁸⁴ Vgl. dazu bereits frühzeitig: Umweltbundesamt (2006, Permafrost). Generell dazu auch: ESKP (2021, Permafrost); Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 25-26; sowie grundlegend auch: IPCC (2019, Climate).

⁴⁸⁵ Vgl. dazu etwa: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 26: „Modellierungen zufolge könnte demnach durch abruptes Tauen mindestens so viel Kohlenstoff als Kohlenstoffdioxid- und Methan-Emissionen pro °C Erwärmung freigesetzt werden, wie derzeit global jährlich emittiert wird.“

⁴⁸⁶ Vgl. dazu: Abbott et al. (2022, Permafrost), S. 2.

Abb. 56 verdeutlicht den Prozess einer kontinuierlichen – und mit steigender Erderwärmung überproportional zunehmenden – **Freisetzung von Treibhausgasen** in den polaren Permafrostregionen, der in den letzten Jahren schon deutliche Effekte in der globalen CO₂-Bilanz hinterlassen hat.⁴⁸⁷

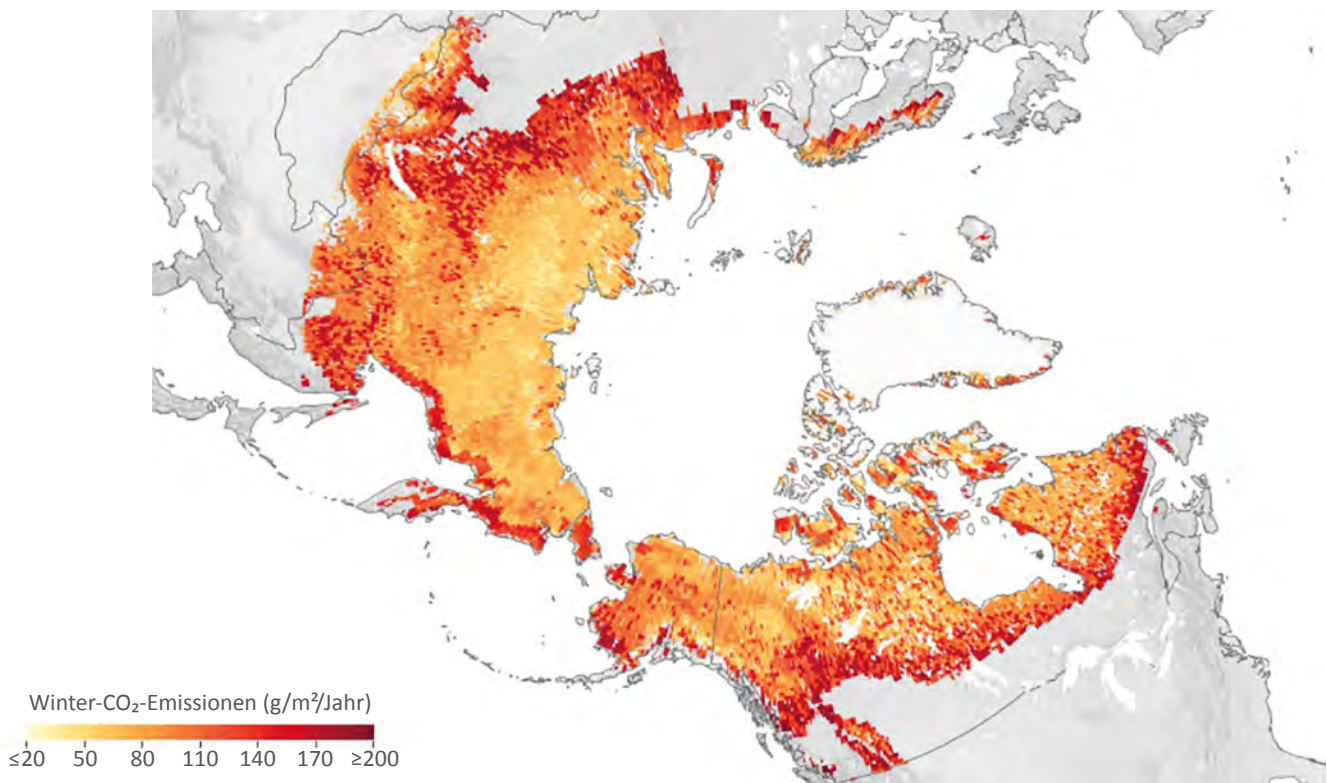
Damit wird klar, dass die fortschreitende arktische Erwärmung, die das sukzessive Auftauen kohlenstoffreicher Permafrostböden nach sich zieht, schon heute (und in kommenden Jahren wohl noch wesentlich

stärker) einen äußerst kritischen **Beitrag zum Prozess der Erderwärmung** leistet. Das Ausmaß dieses zusätzlichen Effekts lässt sich derzeit nur ansatzweise quantifizieren, doch seine Nettowirkung dürfte die bestehende **globale Erwärmungsdynamik spürbar verstärken**.⁴⁸⁸

► Dieser intensive und hochdynamische „**Permafrost-Effekt**“ würde zwangsläufig auch andere kritische Kipppunkte des Erdsystems nochmals stärker unter Druck setzen.⁴⁸⁹

Abb. 56: Freisetzung von Treibhausgasen in den polaren Permafrostregionen

Permafrostboden als Kohlenstoffdioxidquelle in den Wintermonaten
Karte zur Freisetzung für den Zeitraum 2003-2017



Quelle: Bildungsserver Hamburg (2020, Permafrostboden)

⁴⁸⁷ Vgl. dazu insbesondere: Bildungsserver Hamburg (2020, Permafrostboden).

⁴⁸⁸ Vgl. dazu bereits: scinexx.de (2011, Permafrost). Analog auch: IPCC (2023, Report).

⁴⁸⁹ Vgl. in diesem Sinne: Umweltbundesamt (2024, Kippparameter), S. 26: „Abruptes Auftauen könnte bereits bei einer Erderwärmung von 1,5°C (1-2,3°C) ausgelöst werden und würde weitere lokale Kippparameter, wie fortlaufendes Tauen und die weitere Freisetzung von Treibhausgasen, auf subkontinentaler Ebene auslösen.“

Besonders problematisch ist dabei, dass im Permafrost neben CO₂ auch enorme Mengen an CH₄ (Methan) gebunden sind. **Methan** gilt im Vergleich zu CO₂ als deutlich **potenteres Treibhausgas**, dessen klimaschädliche Wirkung nicht nur um ein Vielfaches stärker ist, sondern auch zeitlich schneller einsetzt.⁴⁹⁰ (Vgl. dazu die nachfolgende Info-Box).

Methan (CH₄) erwärmt die Atmosphäre (über einen Zeitraum von 20 Jahren) etwa **80-mal stärker** als CO₂, über 100 Jahre ist der Verstärkungsfaktor noch **rund 28**. (Der Unterschied liegt daran, dass sich Methan in der Atmosphäre relativ schnell abbaut – in acht Jahren um rund die Hälfte).⁴⁹¹ Aufgrund seiner starken Wirkung als Treibhausgas gilt Methan auch als „Der böse Zwillingbruder von CO₂“.⁴⁹²

Während CO₂ über viele **Jahrhunderte** in der Atmosphäre verbleibt und sich dort anreichert, verliert Methan seine klimaschädliche Wirkung innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums.

Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass Methan **anteilig etwa 7 bis 10%** der aus dem Permafrost freigesetzten Emissionen ausmacht.⁴⁹³ Allerdings lässt sich der relative Anteil der tatsächlich austretenden Methangase nur schwer bestimmen, denn dieser kann je nach Bodenbeschaffenheit, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sauerstoffzufuhr und mikrobiellen Bedingungen stark variieren: Unter anaeroben Bedingungen und höheren Temperaturen wird allerdings typischerweise **ähnlich viel Methan wie CO₂** gebildet.⁴⁹⁴

- Klimaforscher räumen deshalb immer öfter ein, dass der **Beitrag von Methanemissionen** aus dem Permafrost möglicherweise bislang deutlich unterschätzt wurde.⁴⁹⁵



Tauender Permafrost produziert mehr Methan als erwartet.

GFZ (2018, Permafrost)



Der dritte entscheidende Aspekt betrifft die **zeitliche und topographische Dynamik** beim Auftauen der arktischen Permafrostböden. Klimaforscher gehen davon aus, dass bei einem sehr schnellen Auftauprozess **weitere Rückkopplungen und nichtlineare Prozesse** ausgelöst werden könnten, die zu einem regelrechten „**Kollaps**“ **kontinentaler Permafrostsysteme** führen würden – mit entsprechend **hoher Intensität** der aus diesen Böden austretenden Treibhausgasemissionen:

- „*Abrupte Tauprozesse und rasch schmelzendes Grundeis [führen] zu sich-selbstverstärkenden Prozessen (...) und können im Vergleich zum langsamen Auftauen **bis zu doppelt so viele Treibhausgasemissionen** in Form von Kohlenstoffdioxid und Methan freisetzen.*“⁴⁹⁶

⁴⁹⁰ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 3.1.2.

⁴⁹¹ Vgl. dazu weiterführend: SCNAT (2023, Klimawirkung). Ähnliche Ergebnisse liefert auch eine Datenrecherche mit KI-Unterstützung; vgl. dazu etwa: Perplexity (2025, Methan).

⁴⁹² Vgl. dazu: DW (2019, Methan).

⁴⁹³ Vgl. dazu: Universität Hamburg CLICCS (2023, Methan). Eine entsprechende Datenrecherche auf KI-Basis erbringt dazu nur wenige weitere Hinweise; vgl. Perplexity (2025, Methan).

⁴⁹⁴ Vgl. dazu: Universität Hamburg CLICCS (2023, Methan); sowie die Originalstudie von: Galera et al. (2023, Ratio). Ähnliche Aussagen folgen bereits aus einer früheren Laboruntersuchung von Christian Knoblauch vom Zentrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) der Universität Hamburg: „Ergebnis: Unter Luftabschluss wird genauso viel Methan produziert wie CO₂.“; zitiert nach: GFZ (2018, Permafrost); dort auch die Gesamteinschätzung: „*Tauender Permafrost produziert mehr Methan als erwartet.*“ Gegenläufige Effekte sind allerdings ebenfalls möglich, worauf Susanne Liebner (GFZ), Leiterin der Helmholtz-Nachwuchsgruppe MicroCene, hinweist: „*Erste Studien deuten darauf hin, dass in der Übergangszone zwischen dauerhaft gefrorenem Untergrund und aufgetauten Schichten ein Teil des freigesetzten Methans durch mikrobielle Prozesse wieder zu Kohlendioxid umgewandelt wird.*“, zitiert nach: ESKP (2017, Permafrost).

⁴⁹⁵ Vgl. in diesem Sinne etwa: scinexx.de (2011, Permafrost); GFZ (2018, Permafrost); Abbott et al. (2022, Permafrost); Galera et al. (2023, Ratio).

⁴⁹⁶ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 26; (Hervorhebungen durch Verfasser).

Wie dazu unter anderem auch *Umweltbundesamt* (2024) nach Auswertung zahlreicher Einzelstudien ausführt, könnte „... der vollständige Kollaps des Permafrostes (...) bei einer **Erwärmung von 4°C** (3-6°C) ausgelöst werden und würde beträchtliche Auswirkungen auf das globale Klima haben.“⁴⁹⁷

- ▶ „Bei einem Permafrost-Kollaps würden auf einer **Zeitskala von 50 Jahren** (10-300 Jahren) bis zu 250 Gigatonnen Kohlenstoff freigesetzt werden, was eine **zusätzliche Erwärmung von 0,2-0,4°C** zur Folge haben könnte.“⁴⁹⁸

Die Besonderheit eines solchen Szenarios liegt vor allem darin, dass der absehbare Prozessverlauf weder verhindert noch abgemildert werden kann – **also irreversibel wäre!** – und den Prozess der treibhausgasbedingten Erderwärmung für längere Zeit und mit **hoher Intensität** weiter beschleunigen würde („expected to be irreversible, manifesting fully on longer timescales“).⁴⁹⁹

Somit sind der **zeitliche Ablauf** sowie die **regionale Struktur** der fortschreitenden Abtauprozesse im arktischen Permafrost von großer Relevanz für das Gesamtbild. Da sich aber speziell diese Region zuletzt durch ungewöhnlich starke Erwärmung auszeichnet, die gleichzeitig durch ein **System positiver Rückkopplungseffekte** weiter verschärft wird, sollte mit Blick auf die Klimawirkung der Permafrostböden – trotz teilweise noch unklarer Einzelaspekte – vorerst sicherheitshalber ein „Worst Case“-Szenario unterstellt werden.⁵⁰⁰

- ▶ Dieser Punkt ist umso bedeutsamer, als offensichtlich in einer Vielzahl von Klimamodellen der mögliche Emissionsbeitrag aus Permafrostböden **nicht explizit berücksichtigt** wurde!⁵⁰¹

Um die systemische Kritikalität der globalen Permafrostareale nochmals klar hervorzuheben, verdeutlicht Abb. 57 die **wichtigsten Einflussfaktoren** auf dieses wichtige Kippelement.⁵⁰²

Auch an dieser Stelle stellt sich die Frage, ob die Permafrost-Problematik aus Sicht der Erdsystemforschung einen **kritischen Kippunkt** konstituiert. Dieser Punkt wird in der Klimawissenschaft unterschiedlich ausgelegt, scheint jedoch bei näherer Betrachtung unstrittig:

Entscheidend dafür sind die Grundcharakteristika einer mutmaßlich sehr schnellen **Problemeskalation** (Auftauprozess mit nachfolgender Treibhausgasfreisetzung), einer endogenen Selbstverstärkung durch **positive Rückkopplung**, zahlreicher kritischer **Interdependenzen** mit anderen Teilsystemen sowie der unmittelbar **verschärfenden Auswirkungen** auf den (bereits mit hoher Dynamik laufenden) Prozess der Erderwärmung.

Damit kann der entsprechenden Einschätzung von **PIK** (2025) uneingeschränkt gefolgt werden:

- ▶ „Im Vergleich zum **graduellen Abtauen** könnte solch ein **abrupter Kippprozess** den Kohlenstoffausstoß der Permafrostböden um 50-100% steigern und möglicherweise den großflächigen Kollaps des Borealen Permafrosts auslösen.“
- ▶ **In jedem Fall würde das Abtauen mit der Freisetzung großer Mengen von Treibhausgasen zur globalen Erhitzung beitragen, und damit zu allen Klimarisiken, von Extremwetter bis Meeresspiegelanstieg.**⁵⁰³

⁴⁹⁷ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 26.

⁴⁹⁸ Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken), S. 26; unter Verweis auf: Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points).

⁴⁹⁹ Vgl. dazu die Ergebnisse einer neuen Studie von Park et al. (2025, Permafrost); sowie vollständiges Zitat: „However, among several components of the Earth system, carbon (C) release from permafrost is expected to be irreversible, manifesting fully on longer timescales.“

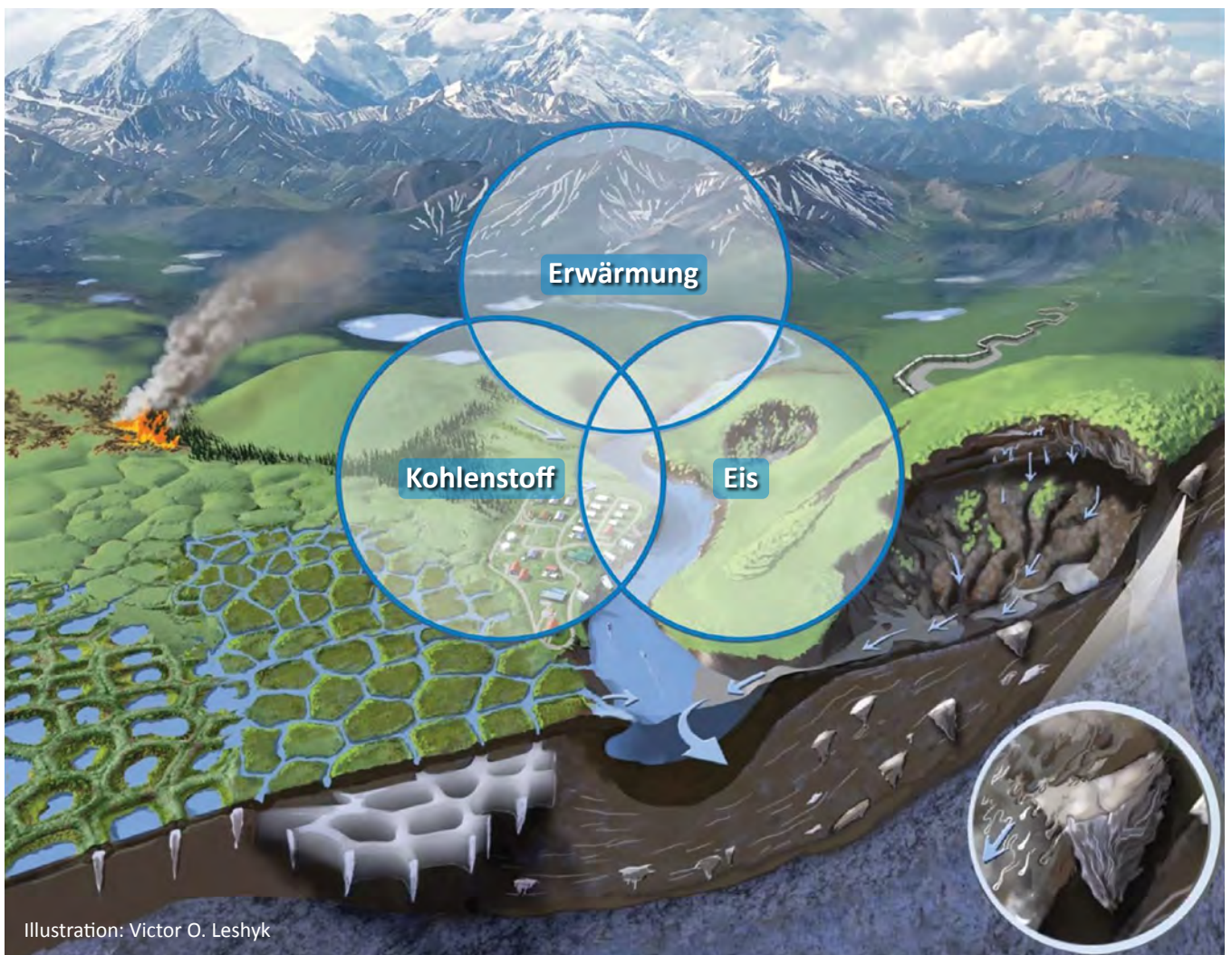
⁵⁰⁰ Vgl. übereinstimmend und mit zahlreichen Einzelnachweisen: Science Media Center (2025, Permafrost); analog auch eine ausführliche Studie von: Park et al. (2025, Permafrost).

⁵⁰¹ Vgl. dazu etwa: Abbott et al. (2022, Permafrost), S. 2: „Until recently, permafrost domain GHG release was omitted from the Earth system models (ESMs) used to predict climate change trajectories and inform international climate targets“. Analog auch: Galera et al. (2023, Ratio): „There are large uncertainties regarding the controls of CH₄ production and emission in the vast Russian Arctic tundra, and consequently the response of CH₄ emission to climate change.“

⁵⁰² Vgl. dazu: Bildungsserver Hamburg (2024, Permafrost Landscape).

⁵⁰³ PIK (2025, Erdsystem), („Permafrostböden“); (Hervorhebungen teilweise im Original). Skeptischer wird diese mögliche Interaktion allerdings beurteilt bei: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 182: „The potential for permafrost carbon emissions to alter the rate and magnitude of global warming is still uncertain (due to missing model representation and lack of observations) and likely to be too small to be self-perpetuating.“

Abb. 57: Zentrale Einflussfaktoren und Wirkungsmechanismen bei Permafrostböden



Quelle: Bildungsserver Hamburg (2024, Permafrost Landscape); leicht modifiziert

Direkte und indirekte Interdependenzen mit anderen Kippelementen und Kippdynamiken:

Starke direkte Auswirkung des **Permafrost-Auftauens** auf regionale Topographie (▷ Instabilität).

Starke indirekte (globale) Auswirkungen über **beschleunigte Freisetzung von Methan (sowie CO₂)**: Zunahme der globalen **Erwärmungstendenz** mit

adverser **Rückwirkung** auf andere Kippelemente (▷ Verstärkung/Beschleunigung der jeweiligen Kippdynamiken).

Insgesamt: Beidseitig starke Interdependenz/ Verstärkung/Rückkopplung mit arktischer und damit auch **globaler Erwärmung**.

5.7 Gebirgsgletscher und alpine Strukturen

Zur globalen Kryosphäre gehören, neben den polaren Eiskappen und den borealen Permafrostböden, auch die weltweiten **Gebirgsgletscher** und alpinen Strukturen. Dieser wichtige Bereich wird zwar derzeit im Rahmen der Klimakippelemente nicht konkret erfasst. Dennoch haben die eisbedeckten Gebirgsregionen eine **Vielzahl klimarelevanter Funktionen**, die nicht unterschätzt werden sollten. Da sich die globale Erwärmung inzwischen auch bei den großen Gletschern und Gebirgsstrukturen zunehmend bemerkbar macht, sind diese Punkte von absolut zentraler Bedeutung.⁵⁰⁴

Denn die aktuelle Realität ist kaum zu übersehen:

- ▶ **Nahezu alle großen Hochgebirgsregionen weltweit – darunter auch die Himalaya-Region – zeigen inzwischen sehr deutliche Anzeichen eines stetigen und rasch fortschreitenden Abschmelzens.**⁵⁰⁵



Das Dach der Welt schmilzt

Asakawa (2025, Dach)



Gebirgsgletscher als „Wassertürme“ und wichtige Wasserregulatoren

Zu den wichtigsten Wirkungsmechanismen globaler Gletscherregionen zählt insbesondere ihre Funktion als bedeutende **Süßwasserreservoir**e sowie als „klimatischer Puffer“, denn:

- ▶ Große Gebirgsgletscher und Hochgebirgsregionen, darunter das gesamte *Himalaya-Hindukusch-System* sowie das *Tibetische Hochland*, fungieren für eine Vielzahl globaler Lebensräume als zentrale **Trinkwasserquelle**.⁵⁰⁶
- ▶ Gletscher binden enorme Mengen an Süßwasser, das in Form von Schnee und Eis „gespeichert“ und durch jährlich wiederkehrende Schmelzprozesse „freigegeben“ wird.
- ▶ Die größten Flusssysteme in Asien, Europa und Nordamerika speisen sich primär durch **Schmelzwasser** aus dem Einzugsgebiet großer Gebirgsgletscher und alpiner Strukturen.⁵⁰⁷

Insbesondere die großen und weit verzweigten Flusssysteme Asiens, darunter *Indus*, *Brahmaputra*, *Ganges*, *Jangtsekiang* oder *Mekong*, sind für die Existenz eines großen Teils der Menschheit absolut essentiell. Denn: Nicht nur die gesamte **Lebensmittelproduktion** in vielen Teilen Asiens (vor allem der Reisanbau), sondern auch große Teile der regionalen Wirtschaftsleistungen wären ohne Wasserzufuhr aus den großen Flüssen schlicht nicht vorstellbar.⁵⁰⁸

Die *Himalaya-Hindukusch-Region* – auch bekannt als das „*Dach der Welt*“ – nimmt dabei eine besondere Rolle ein:

Sie speist unmittelbar die **zehn größten Flüsse und Süßwassersysteme Asiens** und determiniert damit direkt und indirekt die Lebensumstände von mehreren Milliarden Menschen.⁵⁰⁹

- ▶ „Die Gletscher des Himalajas sind die **Wassertürme Asiens** und die **Quelle vieler großer Flüsse**, darunter *Brahmaputra*, *Ganges* und *Indus*.“⁵¹⁰

⁵⁰⁴ Vgl. zu einer Darstellung des aktuellen Sachstandes und entsprechender Ableitungen: IPCC (2023, Report), S. 5; 46-47; 69; 71; analog und überblickartig auch: PIK (2025, Erdsystem).

⁵⁰⁵ Vgl. dazu sehr informativ und mit einer detaillierten „*Gletschermassenbilanz*“: WGMS (2025, Glacier); sowie sehr ausführlich auch das *Global Glacier Change Bulletin* No. 5 (2020-2021): WGMS (2023, Bulletin). Mit Blick auf die *Himalaya-Region* vgl. etwa: Asakawa (2025, Dach). Zu einer kritischen Gesamtschau und Diskussion der bisher beobachteten Eisverluste vgl. auch: Helmholtz-Klima (2021, Klimawandel).

⁵⁰⁶ Vgl. dazu ausführlich und mit zahlreichen Details: GRID-Arendal (2015, Himalaya); sowie weiterführend: CFE-DMHA (o.A., Case Study), Asakawa (2025, Dach).

⁵⁰⁷ Vgl. dazu überblickartig: DW (2025, Gletscher).

⁵⁰⁸ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 5.5. Hinzu kommt, speziell beim Reisanbau, noch die möglichst regelmäßige Bewässerung durch Monsunregen; vgl. dazu bereits: oben, Kap. 3.2.3.

⁵⁰⁹ Vgl. dazu insbesondere: GRID-Arendal (2015, Himalaya); Asakawa (2025, Dach).

⁵¹⁰ WWF (2021, Pol).

Die gesamte *Himalaya-Hindukusch*-Region gilt auch als „... **dritter Pol der Erde**“, da sich dort „... die größten Eismassen außerhalb der Arktis und der Antarktis befinden.“⁵¹¹ Aktuell erwärmt sich dieses Areal jedoch **dreimal schneller als der weltweite Durchschnitt!**

- ▶ Damit zählt diese wichtige Region zu den sensitivsten und von der globalen **Erwärmung am stärksten betroffenen Teilsystemen** überhaupt.⁵¹²



The Hindu Kush Himalayas are warming about three times faster than the global average.

GRID-Arendal (2015, Himalaya)



Diverse Klimamodelle und Schätzungen gehen davon aus, dass die *Hindukusch-Himalaya*-Region (bei einer Fortschreibung aktueller Trends der globalen Erwärmung) bis zum Ende des Jahrhunderts rund **zwei Drittel ihrer Eismasse** verlieren würde. Selbst bei rascher und wirksamer Begrenzung auf einen stabilen 1,5°C-Pfad wäre noch mit einem **Verlust von rund 36%** zu rechnen.⁵¹³

Weitere Analysen machen deutlich, dass ein solcher Eisverlust langfristig selbst dann **irreversibel** wäre, wenn die Erderwärmung nach einem kurzfristigen „Überschießen“ schnell wieder auf einen „neutralen“ Pfad zurückgeführt werden könnte:

- ▶ „Eine Überschreitung von 1,5°C, auch wenn sie nur vorübergehend ist, bedeutet einen **Gletscherschwund für Jahrhunderte**.“⁵¹⁴

Die Dramatik dieser Entwicklung, speziell in der *Hindukusch-Himalaya*-Region, sollte keinesfalls unterschätzt werden. Denn: Ein beschleunigtes Abtauen dieser enormen Eismassen in kommenden Jahren wäre gleichbedeutend mit einem – möglicherweise sehr abrupten – Verlust großer Wasserreservoirs und scharfen **Verknappungen der dortigen Wasserversorgung**:

- ▶ „Die Folgen wären eine **verminderte Wasserverfügbarkeit**, die Gefährdung der Lebensmittel- und Energiesicherheit sowie ein beschleunigter Verlust der Artenvielfalt.“⁵¹⁵

Derartige Verwerfungen würden mit großer Wahrscheinlichkeit **massive Verteilungskonflikte** sowie – daraus unmittelbar resultierend – gravierende geopolitische und gesellschaftliche Spannungen nach sich ziehen. Vor den schon in naher Zukunft absehbaren Konsequenzen warnt eindringlich der Präsident der *Asiatischen Entwicklungsbank*, *Asakawa* (2025):

- ▶ „Schwindende Flussläufe könnten die Bewässerung der Felder in einem Gebiet erschweren, aus dem etwa **ein Drittel des weltweit produzierten Reises und ein Viertel des Weizens** stammen.“⁵¹⁶
- ▶ „Das Abschmelzen der Gletscher droht also **irreversible Schäden** für die in der Nähe lebenden Bevölkerungen und die lokale Wirtschaft zu verursachen. Weltweit würde sich die **Instabilität verschärfen**, etwa durch zunehmende Migration, unterbrochene Handelsströme und steigende Lebensmittelpreise.“⁵¹⁷

⁵¹¹ Asakawa (2025, Dach); (Hervorhebungen durch Verfasser); sowie bereits: WWF (2021, Pol); (Hervorhebungen im Original).

⁵¹² Vgl. dazu explizit: GRID-Arendal (2015, Himalaya): „*The Hindu Kush Himalayas are warming about three times faster than the global average.*“ Dazu auch: CFE-DMHA (o.A., Case Study): „*The HKH [Hindu Kush Himalayas] is one of the most vulnerable regions in the world to climate change.*“

⁵¹³ Vgl. dazu ausführlich und mit weiteren Nachweisen: CFE-DMHA (o.A., Case Study).

⁵¹⁴ *Fabien Maussion*, außerordentlicher Professor für polare Umweltveränderungen an der *Universität Bristol*, in Beantwortung der Frage „*Können Gletscher wieder wachsen, wenn globale Erwärmung gebremst wird?*“; dort auch konkret: „*Unsere Studie zeigt, dass ein Großteil dieser Schäden nicht einfach rückgängig gemacht werden kann – selbst wenn die Temperaturen später wieder auf ein sichereres Niveau zurückkehren.*“; jeweils zitiert nach: Euronews (2025, Gletscher); (Hervorhebungen durch Verfasser). Analog dazu aber auch bereits: IPCC (2023, Report), S. 46: „*Impacts on some ecosystems are approaching irreversibility such as the impacts of hydrological changes resulting from the retreat of glaciers*“

⁵¹⁵ Asakawa (2025, Dach); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁵¹⁶ Asakawa (2025, Dach); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁵¹⁷ Asakawa (2025, Dach); (Hervorhebungen durch Verfasser).



The Hindu Kush Himalayas (HKH) are the freshwater towers of South Asia and parts of Southeast Asia. Water originating from their snow, glaciers and rainfall feed the ten largest river systems in Asia.

GRID-Arendal (2015, Himalaya)



Dieser enorme Einfluss großer Gebirgsgletscher auf eine Vielzahl ökologischer und ökonomischer Prozesse – und oftmals auch auf die pure Überlebensfähigkeit – unterstreicht die Bedeutung der Gletscher als extrem wichtiger Sphäre des globalen Klimasystems. In diesem Sinne konstatiert auch *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung* (2025):

- ▶ „Die Versorgung mit Süßwasser hängt in vielen Gebieten der Welt ganz entscheidend vom jährlich zuverlässig und gleichmäßig auftretenden Schmelzwasser ab. Verschwinden die Gletscher, fehlt den Menschen das Schmelzwasser.“⁵¹⁸

Alpine Strukturen und Permafrost

Durch den regelmäßigen Wechsel zwischen Vereisung und späterer Schnee- und Eisschmelze stellen die großen Gletschersysteme nicht nur enorme Mengen an Trinkwasser bereit, sondern regulieren so auch die **natürliche Zyklus** ganzer Lebensräume in den Einzugsgebieten großer Flüsse.⁵¹⁹

Gleichzeitig bilden sie auch die Basis für umfassende und oft hochkomplexe Wirtschaftsprozesse:

- ▶ So zeigt ein Blick nach Europa, dass mit *Rhein* und *Rhone* zwei der bedeutendsten westeuropäischen Flusssysteme direkt aus **hochalpinen Gletschern** gespeist werden.⁵²⁰
- ▶ Beide Flüsse sind für die Wirtschaft Europas von enormer Bedeutung, nicht zuletzt als **Transportwege** und Grundlage weitverzweigter Lieferketten.
- ▶ Hinzu kommen weitere Nutzungsbereiche wie Tourismus, Weinbau oder – ebenfalls von großer Bedeutung – die Bereitstellung von **Kühlwasser** für essentielle Kraftwerke.

Dieser Trend eines **fortschreitenden Gletscherschwunds** vollzieht sich sehr deutlich auch im Bereich der europäischen Alpen. Ein plakatives (und auch für Laien leicht nachvollziehbares) Beispiel bietet die Entwicklung des *Rhonegletschers* im Zeitablauf von 1850 bis 2010, dargestellt in Abb. 58.⁵²¹

Abb. 58: Beschleunigtes Abschmelzen des Rhonegletschers



Quelle: Spektrum (2010, Alpengletscher)

⁵¹⁸ PIK (2025, Erdsystem); („Gebirgsgletscher“).

⁵¹⁹ Vgl. dazu überblickartig (mit Fokus auf Asien): GRID-Arendal (2015, Himalaya): „Many human activities, most notably agriculture, are timed with the seasonal flows of water and predictable cycles of rain.“ Analog auch: CFE-DMHA (o.A., Case Study).

⁵²⁰ Der *Rhein* hat seinen Ursprung in über 2.300 Metern am *Operalppass*; die *Rhone* entspringt auf rund 2.000 Metern Höhe am *Rhonegletscher* beim *Furkapass* (beide in der Schweiz).

⁵²¹ Vgl. zum Hintergrund: Spektrum (2010, Alpengletscher). Analog dazu und mit weiteren zeitlichen Vergleichsbildern für diverse Schweizer Gletscher auch: Wasser und Eis (2020, Vergleichsbilder).

Insbesondere in der Schweiz, die in Europa mit rund 1.400 Gletschern das „Herz der Hochalpen“ bildet, zeigt sich der fortschreitende Schwund alpiner Gletscherstrukturen: Wie Messungen zeigen, gibt es dort seit mehr als 20 Jahren **kein Gletscherwachstum** mehr, und auch die jährlich wiederkehrende Gletscherschmelze beginnt immer früher. Nach Angaben des Gletschermessnetzes *Glamos* hat sich das Volumen der Schweizer Gletscher seit 1950 von 92,3 auf 46,5 Kubikmeter **faktisch halbiert**.⁵²²

Nach Ansicht von Klimaforschern und Glaziologen könnten speziell in den europäischen Alpen viele Gletscher schon gegen **Mitte oder Ende dieses Jahrhunderts weitgehend eisfrei** sein.⁵²³ Dieser Befund ist alarmierend, vor allem für viele Teile Mitteleuropas. Sollte dies zutreffen, wären die potentiellen Folgen gravierend, denn:

- ▶ Der typische Prozess der jährlichen **Schmelzwasserzufuhr**, der für die großen europäischen Flusssysteme von zentraler Bedeutung ist, käme praktisch zum Erliegen – mit einer Vielzahl oftmals schwerwiegender Folgewirkungen (auch zweiter und dritter Ordnung).⁵²⁴



Der Permafrost hält Boden und Felsen wie Klebstoff zusammen.

Wetter Online (2025, Bergstürze)



Als weitere Folge der globalen Erwärmung kann – speziell in den alpinen Bergregionen – eine zunehmende **Instabilität** höhergelegener Bergmassen eintreten. Diese werden oftmals durch **Vereisung** winziger Risse und Spalten im Gestein zusammengehalten und stabilisiert. Entsprechend gilt dieser Effekt „... als ‚Kleber‘ oder ‚Kitt‘ (...), der die Berge im Inneren zusammenhält.“⁵²⁵

Schmilzt allerdings infolge zunehmender Erwärmung das **kapillare Eis**, werden Bergstürze sowie das regelrechte „Abbrechen“ größerer Berghänge oder ganzer Bergkuppen zunehmend wahrscheinlicher.⁵²⁶

- ▶ Diese **geologische Instabilität** tritt in den europäischen Alpen bereits vermehrt in Erscheinung; so wurde zuletzt das Schweizer Bergdorf *Blatten* durch einen massiven Bergsturz (*Birchgletscher*) nahezu vollständig verschüttet.⁵²⁷
- ▶ Infolge der globalen Erwärmung halten Glaziologen eine **Beschleunigung dieses Phänomens** für sehr wahrscheinlich und sehen dies durch regelmäßige Messungen bestätigt.⁵²⁸

Als mögliche Risiken drohen **massive Auswirkungen auf alpine Siedlungsräume** (Gefahr für Bergdörfer sowie Ansiedlungen in Tälern). Zudem würden wichtige Wirtschaftsfaktoren wie (Ski-)Tourismus und Alpinismus stark in Mitleidenschaft gezogen oder müssten aus Sicherheitsgründen deutlich eingeschränkt oder ganz aufgegeben werden.⁵²⁹

- ▶ Sollten Bergstürze in Richtung bestehender Bergseen oder Speicherseen abgehen, was in Einzelfällen ernsthafte Risikowahrscheinlichkeiten aufweist, könnten außerdem auch **massive Überflutungen** betroffener Regionen drohen.⁵³⁰

⁵²² Vgl. dazu mit entsprechenden Verweisen: ntv (2025, Gletscher). Weiterführend dazu auch: GLAMOS (2025, Glaciers). Ähnliche Ergebnisse (über einen längeren Zeitraum) zeigt auch eine satellitengestützte Analyse von: Mannerfeldt et al. (2022, Halving).

⁵²³ Die überproportionale Erwärmung in Europa spielt dafür eine entscheidende Rolle. Vgl. dazu etwa: IPCC (2023, Report), S. 71: „... many low-elevation and small glaciers around the world would lose most of their mass or disappear within decades to centuries (high confidence).“

⁵²⁴ Zu den schon heute – und immer öfter – erkennbaren Konsequenzen zählt etwa ein (zu) niedriger Flusspegel im *Rhein*, was die dortige Transportschifffahrt gefährdet und in vielen Bereichen kritische Versorgungsengpässe hervorrufen kann. Hinzu kommen Probleme und Risiken bei der Kühlung diverser (vor allem französischer) Kernkraftwerke in der Rheinebene. Vgl. dazu überblickartig: ZDF heute (2025, Niedrigwasser). Ergänzend dazu auch: MDR (2022, Niedrigwasser); Tagesschau (2023, Niedrigwasser).

⁵²⁵ Science (2023, Permafrost).

⁵²⁶ Hinzu kommt, dass ein Abschmelzen vorher vereister Gletscher aufgrund glazialer Schleifprozesse meist relativ lockeres Geröll zurücklässt, das dann leichter abrutschen kann; vgl. dazu ausführlich etwa: Wetter Online (2025, Bergstürze).

⁵²⁷ Vgl. dazu ausführlich: Tagesschau (2025, Gletschersturz).

⁵²⁸ Gemäß der *Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)* sind die Permafrost-Temperaturen von 2014 bis 2025 an vielen Messstellen in den Schweizer Alpen um über 0,8°C gestiegen; vgl. dazu: SCNAT (2025, Permafrost); dort auch die Einschätzung: „Diese Veränderungen werden sich auch in den kommenden Jahren und Jahrzehnten fortsetzen.“

⁵²⁹ Vgl. für einen guten Gesamtüberblick mit zahlreichen Nachweisen etwa: Perplexity (2025, Berggrutsch). Diese Aussagen gelten primär für die europäischen Alpen, sind aber grundsätzlich auch auf andere glaziale Regionen übertragbar.

⁵³⁰ Vgl. für einen guten Gesamtüberblick mit zahlreichen Nachweisen etwa: Perplexity (2025, Bergstürze).



*Diese Erwärmung setzt sich
in größere Tiefen fort.*

SCNAT (2025, Permafrost)



Diese Befunde aus den europäischen Alpen sind aufgrund klimatischer Besonderheiten zwar nur eingeschränkt auf andere Hochgebirgsregionen (etwa in Nordamerika oder Sibirien) übertragbar. Dennoch gelten die geologischen und klimatologischen Grundaussagen auch dort:

- Tatsächlich zeigen die Gebirgsmassive in *Alaska* oder *Kanada* bereits deutliche Anzeichen eines **fortschreitenden Gletscherschwunds**, mit teilweise sehr hoher Dynamik.⁵³¹

Den **Trend weltweiter Gletschereisverluste**, der sich seit Jahren nicht nur ungebremst fortsetzt, sondern anscheinend sogar beschleunigt, verdeutlichen plakativ auch Abb. 59 und 60, die den Masseverlust wichtiger globaler Gletscher im Zeitraum von 1949/50 bis 2023 darstellen.⁵³²



*So wenig Gletschereis wie heute
gab es auf der Erde in den
zurückliegenden 2000 Jahren nicht.*

World Ocean Review (2024, Klimakrise)



Insgesamt wird auch bei diesem Thema deutlich, dass die derzeit ablaufenden Prozesse in der Kryosphäre **sehr komplexe, äußerst weitreichende und weitgehend irreversible Konsequenzen** nach sich ziehen. Deren Auswirkungen – auch in Form bislang noch unbekannter Effekte oder unterschätzter Rückkopplungen mit anderen Teilsystemen – können äußerst dramatisch sein, nicht zuletzt bei der **existenziellen Frage einer nachhaltig stabilen Wasserversorgung**.⁵³³

Nicht zu unterschätzen ist auch der Einfluss, den abschmelzende Gletscher auf den (zunehmend relevanten) Prozess des **globalen Meeresspiegelanstiegs** ausüben, denn:

- „Ihr Schmelzwasser hat in den zurückliegenden 120 Jahren im Mittel rund 6,72 Zentimeter zum Anstieg des globalen Meeresspiegels beigetragen.“⁵³⁴

Daneben existiert jedoch auch eine Vielzahl möglicher Interdependenzen mit anderen – bereits bekannten – Phänomenen der globalen Erwärmung. Dies gilt etwa für die **überproportionale Erwärmung im Bereich der nördlichen Hemisphäre** sowie (möglicherweise) die Deformation der globalen Höhenströmungen (*Jetstreams*). Darüber hinaus scheint auch der Prozess der **ozeanischen Erwärmung**, speziell im Atlantik, positiv korreliert mit der Dynamik der Eisschmelze europäischer Alpengletscher.⁵³⁵

Zusammenfassend resultiert aus dem aktuellen Trend einer weltweit deutlich beschleunigten Gletscherschmelze ein **hochkomplexes Bild** mit zunehmend kritischen Entwicklungen. Die zahlreichen drohenden und sehr massiven Auswirkungen, insbesondere für (auch geopolitisch) **extrem sensitive Bereiche wie Wasserversorgung und Ernährungssicherheit**, erfordern eine frühzeitige und umfassende sowie möglichst ganzheitliche Risikowahrnehmung.⁵³⁶

- Dabei sollte die Frage, ob das Phänomen der weltweiten Gletscherschmelze das Kriterium eines „echten“ Kippelements erfüllt, weder einer intensiven Problemanalyse im Wege stehen noch die Dringlichkeit möglicher Lösungsansätze in Frage stellen.⁵³⁷

⁵³¹ Vgl. für einen guten Gesamtüberblick mit zahlreichen Nachweisen etwa: Perplexity (2025, Gletscher).

⁵³² Vgl. dazu detailliert: WGMS (2025, Glacier); mit ähnlicher Grundaussage auch: Helmholtz-Klima (2021, Klimawandel): „... der Trend für die weltweite Massenbilanz [der Gletscher] zeigt ganz klar und zunehmend steil nach unten.“

⁵³³ Vgl. grundsätzlich übereinstimmend auch: PIK (2025, Erdsystem).

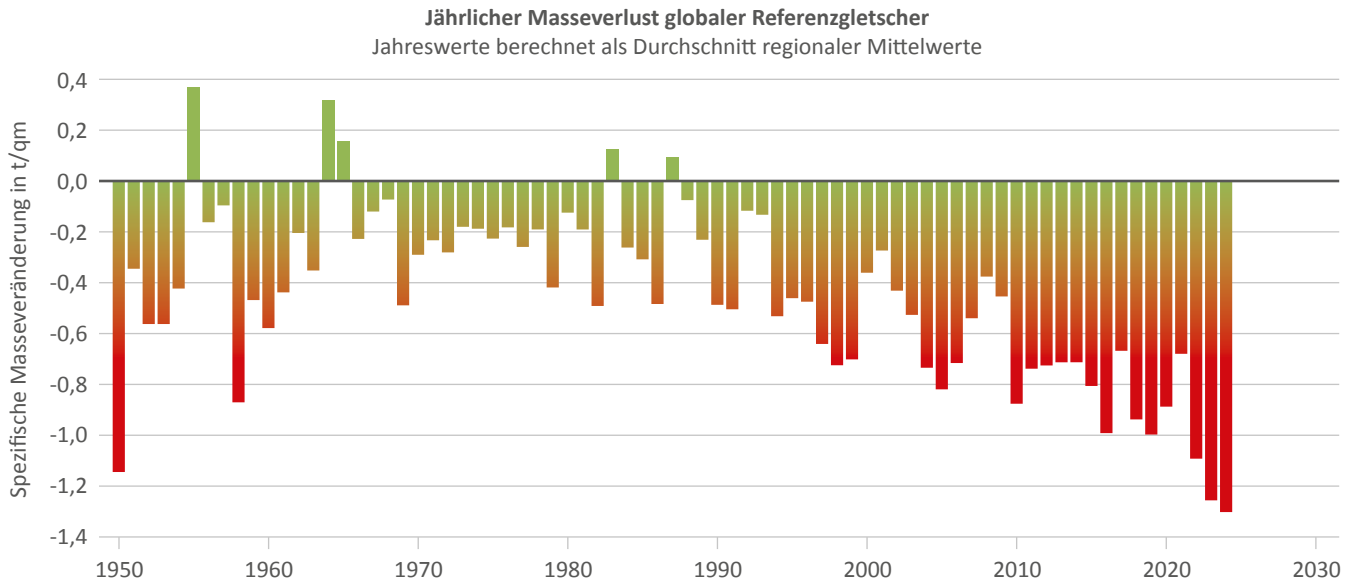
⁵³⁴ World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 16.

⁵³⁵ In diesem Sinne etwa: Spektrum (2010, Alpengletscher).

⁵³⁶ Vgl. in diesem Sinne auch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 16-17.

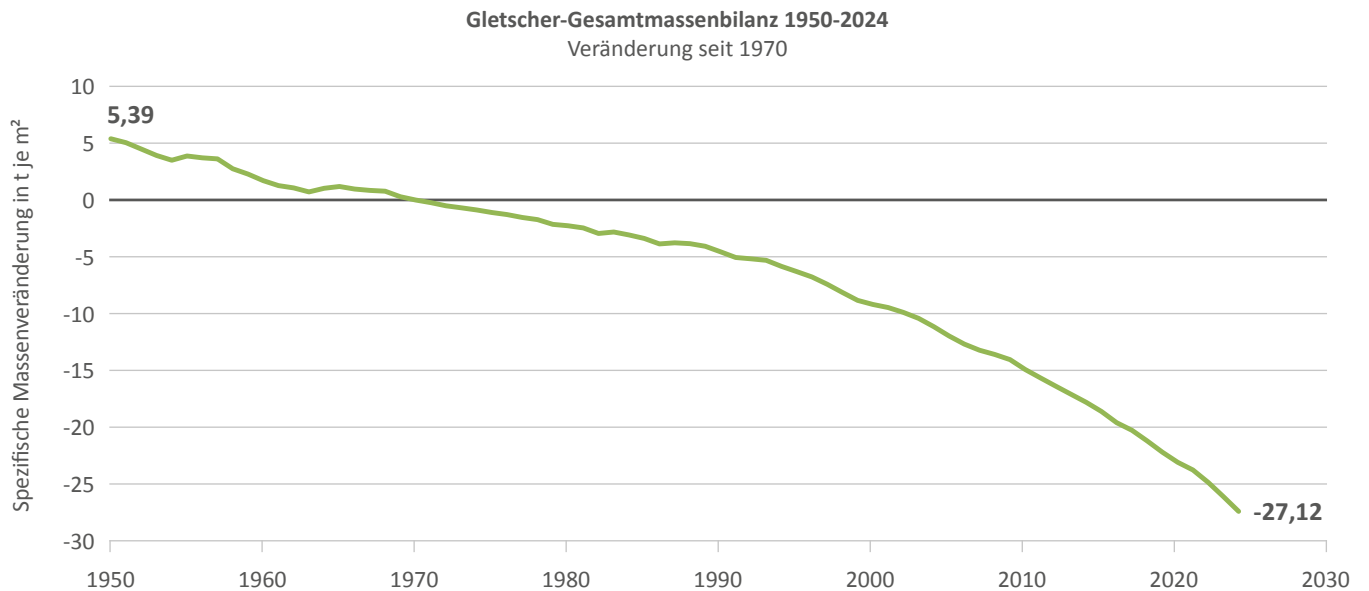
⁵³⁷ Vgl. dazu bereits grundlegend auch: IPCC (2023, Report), S. 46-47; 69; 71. Möglicherweise hat die UN aus genau diesen Gründen das Jahr 2025 zum *Internationalen Jahr des Gletschererhalts* erklärt („*International Year of Glaciers' Preservation*“); vgl. UN (2025, Glaciers).

Abb. 59: Jährlicher Masseverlust wichtiger globaler Gletscher



Quelle: WGMS (2025, Glacier)

Abb. 60: Gletscher-Gesamtmassenbilanz 1950-2024



Quelle: WMO (2025, Climate)

Direkte und indirekte Interdependenzen mit anderen Kippelementen und Kippdynamiken:

Starke direkte Auswirkung der **Gletscherschmelze** auf regionale/kontinentale Wasserkreisläufe sowie auf regionale Topographie (▷ Instabilität).

Moderate indirekte (globale) Auswirkungen über Beitrag zum **Meeresspiegelanstieg**: Dadurch tendenziell adverse **Rückwirkung** auf andere Kippelemente (▷ Verstärkung).

Obwohl die *Jetstreams* nach überwiegender wissenschaftlicher Einschätzung weder ein eigenständiges Kippelement konstituieren noch einen (daraus abgeleiteten) Kippunkt aufweisen, beeinflussen sie sowohl direkt als auch indirekt wichtige planetare Teilsysteme und Klimatelemente.

- ▶ Veränderungen und mögliche **dauerhafte Deformationen** der *Jetstreams* – ausgelöst durch den Prozess der Erderwärmung – sind deshalb von grundsätzlicher Relevanz für eine Analyse klimatischer Kippdynamiken.

Grundeigenschaften der Jetstreams

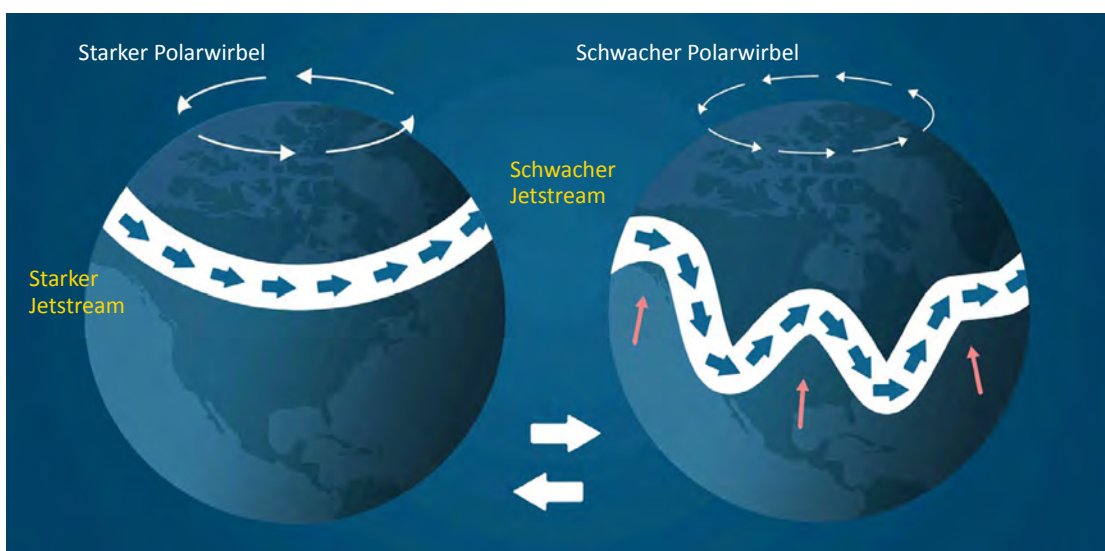
In einem weitgehend stabilen Klimasystem (wie auf der Erde noch vor 50 Jahren der Fall) zeigen die *Jetstreams* eine **große Regelmäßigkeit**. Sie entstehen grundsätzlich als Folge unterschiedlich starker Sonneneinstrahlung am Äquator relativ zu den Polen und verlaufen überwiegend von Westen nach Osten. Diese starken Westwindbänder sind in der Regel „... einige Tausend Kilometer lang, haben aber nur eine Breite von 50 bis 100 Kilometern bei einer Dicke von ein bis zwei Kilometern.“⁵³⁹

- ▶ Solange die thermischen Unterschiede auf der Erdkugel einem regelmäßigen Muster folgen, entwickeln auch die *Jetstreams* ihre typische **bandförmige Charakteristik** und zeigen dabei eine ausgeprägte Stabilität (vgl. Abb. 61; linke Grafik).

5.8 Atmosphärische Höhenströmungen (Jetstreams)

In jüngerer Zeit ist auch das System der atmosphärischen Höhenströmungen – in Fachkreisen bekannt als „*Jetstreams*“ – zunehmend ins Blickfeld der Klimaforschung gerückt. Die *Jetstreams* sind „... sehr schnelle, bandförmige Starkwinde in großer Höhe“, die in einer Höhe von acht bis zwölf Kilometern zwischen Troposphäre und Stratosphäre zirkulieren und dabei Geschwindigkeiten von bis zu 500 km/h erreichen.⁵³⁸

Abb. 61: Unterschiedliche Grundmuster der globalen Höhenströmungen (Jetstreams)



Quelle: Wetter Online (2025, Jetstream)

⁵³⁸ Vgl. dazu: NOAA (2024, Jet Stream); sowie: Perplexity (2025, Jetstreams), (inkl. Zitat).

⁵³⁹ ESKP (2019, Jetstream). Vgl. dazu grundlegend: International Science Council (2021, Arctic); sowie ausführlich auch: Wetter Online (2025, Jetstream).

Jetstreams erzeugen normalerweise eine **relativ stabile Zirkulation** sehr kalter Luft über den Polarregionen, speziell im Bereich der Nordhalbkugel (auch bekannt als „Polarwirbel“). Weiter südlich liegende Bereiche der Erde werden dadurch – „normalerweise“ – zuverlässig gegen ein Vordringen polarer Kaltluft abgeschirmt.⁵⁴⁰



Der Temperaturunterschied zwischen Arktis und Äquator nimmt also ab. In der Folge könnte der Jetstream an Kraft verlieren und immer langsamer werden.

Tagesschau (2025, Arktis)

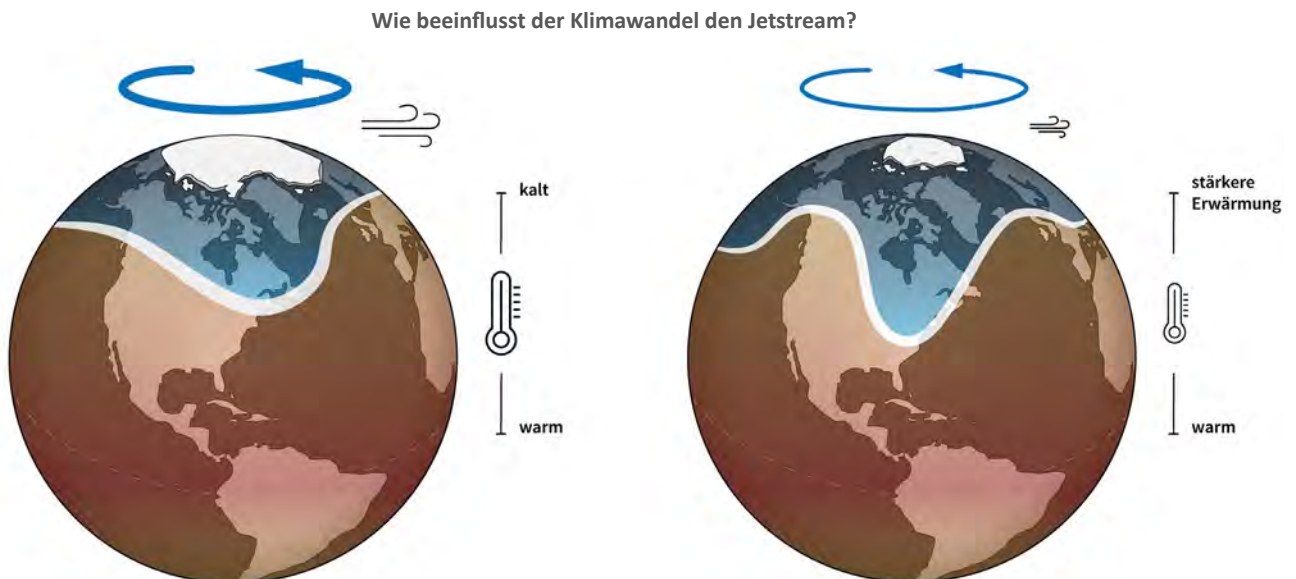


Zunehmende Deformation der Jetstreams

In den letzten Jahren zeigen jedoch speziell die polaren *Jetstreams*, im Einklang mit anderen globalen Klimaphänomenen, eine zunehmende **Instabilität** (vgl. Abb. 62):

- ▶ Diese Veränderung dürfte auf die globale Erwärmung der letzten 50 Jahre zurückgehen, die speziell in der Arktis und der gesamten nordpolaren Region einen **überproportionalen Anstieg von Luft- und Bodentemperaturen** hervorgerufen hat.⁵⁴¹
- ▶ Damit verändern sich auch bislang vorherrschende **Temperaturdifferenzen** auf dem Globus, was für die Ausformung und Stärke der *Jetstreams* eine entscheidende Rolle spielt.⁵⁴²
- ▶ Entsprechend hat sich in den letzten Jahren die Struktur der polaren *Jetstreams* deutlich gewandelt – von einem relativ stabilen *Band* hin zu einem stärker oszillierenden und **mäandernden Wellenmuster** (vgl. Abb. 61 und 62; rechte Grafik).⁵⁴³

Abb. 62: Arktische Erwärmung deformiert polare Jetstreams



Quelle: ESKP (2019, Jetstream)

⁵⁴⁰ Vgl. dazu ausführlich: International Science Council (2021, Arctic); (Grafik zu *Polar Vortex*).

⁵⁴¹ Bildungsserver Hamburg (2025, Meereis) erklärt dazu: „Wenn sich wie in den letzten Jahren die Meereisausdehnung im Sommer stark verringert, kommt es im Endeffekt zu einer Schwächung des Polarwirbels: Warme Luft kann dann besser in das Polargebiet eindringen und kalte Luft in niedrigere Breiten ausströmen.“ Vgl. dazu analog auch: ESKP (2019, Jetstream); ausführlich auch: International Science Council (2021, Arctic); sowie bereits: oben, Kap. 5.2, mit der grafischen Darstellung in Abb. 23 sowie 24.

⁵⁴² Von besonderer Bedeutung ist dabei der wachsende Temperaturunterschied zwischen Nordpol und Äquator; diese Differenz wird stark beeinflusst durch die „arktische Verstärkung“ („*arctic amplification*“). Vgl. dazu ausführlich: International Science Council (2021, Arctic); sowie bereits: oben, Kap. 5.2.

⁵⁴³ Vgl. dazu ausführlich: ESKP (2019, Jetstream).

Noch ist relativ unklar, inwieweit diese Veränderungen auch andere globale Klimaphänomene beeinflussen oder sogar entscheidend verändern. Gut belegt scheint jedoch, dass sowohl die in den letzten Jahren verstärkt aufgetretenen **extremen Kältewellen** in Nordamerika als auch die **Zunahme ausgeprägt stationärer Unwetterlagen** (unter anderem in Europa) durch eine Abschwächung der polaren *Jetstreams* hervorgerufen sein könnten.⁵⁴⁴ Denn:

- ▶ Das stärkere „Mäandern“ der *Jetstreams* in Wellenform bedingt zwangsläufig ein stärkeres Vordringen polarer Kaltluft auch in weiter südlich liegende Regionen (wie in Nordamerika).⁵⁴⁵

Gleichzeitig führt die relative Abschwächung der *Jetstreams* auch zu einer **Verlangsamung** der Mobilität globaler Hoch- und Tiefdruckgebiete, was eine **stärkere Stationarität** regionaler Wetterphänomene mit sich bringt – mit oftmals unbeweglichen und lang **anhaltenden Extremwetterereignissen**.⁵⁴⁶

- ▶ „Schon jetzt ziehen Hoch- und Tiefdruckgebiete in Europa oft über Tage oder Wochen kaum weiter. Aus diesem ‚Standwetter‘ können sich dann schwere Gewitter, lang anhaltende Regenfälle oder Hitzewellen entwickeln.“⁵⁴⁷

Arktische Erwärmung als wichtiger Treiber

Offensichtlich besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Abschwächung des polaren *Jetstreams* und der Dynamik der globalen Erwärmung, die in der **Arktis** besonders stark ausgeprägt ist. Mit Blick auf die zunehmende – und deutlich überproportionale – **Erwärmung in der Nordpolregion** wird klar, dass dieses Phänomen direkt auf die Struktur und die Stabilität der *Jetstreams* einwirkt. Daraus lässt sich schließen, „... dass das Schmelzen der Gletscher auch **Einfluss auf den polaren Jetstream** und damit auf das Wetter in ganz Europa hat.“⁵⁴⁸

Komplexe atmosphärische Modellierungen des *Alfred-Wegener-Instituts* (2019) liefern klare Hinweise, die auf eine **Verstärkung solcher extremer Wetterphänomene** schließen lassen:

- ▶ „Sollte die Eisdecke weiter schrumpfen, ist (...) damit zu rechnen, dass die bislang beobachteten Extremwetterereignisse in den mittleren Breiten in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen.“⁵⁴⁹

Damit wird deutlich, dass die atmosphärischen Veränderungen der *Jetstreams* nicht nur ihre konkrete Ursache im men-

⁵⁴⁴ Diese Grundaussage geht zurück auf eine Untersuchung von Francis/Vavrus (2012, Amplification). Auch Bildungserver Hamburg (2025, Meereis) geht von einem solchen Zusammenhang aus: „Als Folge [einer Abschwächung des polaren *Jetstreams*] kommt es zu blockierenden Wetterlagen, durch die Extremwetter längere Zeit stationär bleiben.“ Vgl. in diesem Sinne ebenfalls sehr klar: ESKP (2019, *Jetstream*); skeptischer hingegen: Wetter Online (2025, *Jetstream*).

⁵⁴⁵ Vgl. ESKP (2019, *Jetstream*): „Die so ausgelösten Wellen (...) schicken dann arktische Luft nach Süden in mittlere Breitengrade. (...) Diese Wellen führen wiederum im Winter bei uns in den mittleren Breiten zu ungewöhnlichen Kaltlufteinbrüchen aus der Arktis.“ Analog auch: International Science Council (2021, Arctic): „The weakened jet stream meanders and brings the polar vortex further south, which results in extreme weather events in North America, Europe and Asia.“

⁵⁴⁶ Vgl. ESKP (2019, *Jetstream*): „Starkregen in Südeuropa und Hitzerekorde in Nordeuropa waren die Folge. Im Sommer verursacht ein schwächerer *Jetstream* langanhaltende Hitzewellen und Trockenheit wie sie Europa unter anderem auch in den Jahren 2003, 2006 und 2015 erlebte.“

⁵⁴⁷ Tagesschau (2025, Arktis).

⁵⁴⁸ Tagesschau (2025, Arktis); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁵⁴⁹ ESKP (2019, *Jetstream*), unter Bezugnahme auf eine Studie des *Alfred-Wegener-Instituts* (2019): „Mithilfe dieses neuen Kombi-Modells können die Forscher also nun zeigen, dass der wellenförmige Verlauf des *Jetstreams* im Winter und die damit verbundenen Extremwetterlagen wie Kälteeinbrüche in Mitteleuropa und Nordamerika eine direkte Folge des Klimawandels sind.“; vgl. dazu: AWI (2019, Wetterextreme); sowie die Originalstudie unter: Romanowsky et al. (2019, Stratospheric). Die Stringenz dieser Ergebnisse ist allerdings derzeit in der Klimaforschung noch umstritten: So finden etwa Blackport/Screen (2020, Amplification) keine signifikanten Nachweise für einen engen Zusammenhang. Klar bestätigend hingegen die Ergebnisse einer Analyse von: Cohen et al. (2024, Anomalous), die eine „direkte und quasi-lineare Beziehung“ zwischen arktischer Erwärmung und extremen Kälteeinbrüchen in mittleren Breiten belegen. Das *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)* verweist zudem auf einen möglichen Zusammenhang mit den Meereszirkulationen im Nordatlantik; vgl. dazu: PIK (2025, Erdsystem), („Zirkulation im Labrador- und Irminger-Meer“).

schengemachten Klimawandel haben, sondern wohl auch direkt – und in zunehmendem Ausmaß – auf wichtige Stellhebel des globalen Klima- und Wettergeschehens einwirken. Eine zentrale Rolle spielt dabei offensichtlich die **rapide arktische Erwärmung** – angetrieben vom Phänomen der „*arktischen Verstärkung*“.⁵⁵⁰

- ▶ Trotz dieser hohen **systemischen Interdependenz** gelten die *Jetstreams* jedoch (nach derzeit herrschender Einschätzung) nicht als echtes Klimakippelement, da sie (mutmaßlich) keine signifikante Rückkopplung zu anderen Subsystemen des Weltklimas und (zumindest nach bisherigem Kenntnisstand) auch keine kritischen Schwellenwerte aufweisen.⁵⁵¹

Auch wenn somit das *Jetstream*-Phänomen wohl kein „echtes“ Kippelement des Erdsystems repräsentiert, sollte die verstärkte Deformation der *Jetstreams* nicht unterschätzt werden, denn:

- ▶ Allem Anschein nach wird dadurch das **Eintreten zerstörerischer Wetterereignisse** – klirrende Kälte, massive Überflutungen oder extreme Trockenheit – auch in bislang gemäßigten Breiten deutlich wahrscheinlicher.⁵⁵²

- ▶ Damit wirkt die Veränderung der *Jetstreams* als **weitere Manifestation des globalen Klimawandels**, die zunehmende Auswirkungen auf planetare Lebensräume hat und eine möglicherweise drastische Anpassung menschlicher Lebensweisen erfordert.⁵⁵³

Die ohnehin komplizierte planetare Situation, mit einer progressiv voranschreitenden und oftmals **alarmierenden Klimatransformation**, wird dadurch tendenziell weiter verschärft.

Direkte und indirekte Interdependenzen mit anderen Kippelementen und Kippdynamiken:

Direkte Auswirkung der ***Jetstream-Veränderungen*** auf regionale/kontinentale Klimazonen, Niederschlagsmuster und Extremwetterereignisse (▷ Erhöhte Variabilität/Extreme Ausschläge).

Indirekte Auswirkungen auf ***arktische Erwärmung*** und ***polare Eisschmelze*** (wahrscheinlich).

Insgesamt: Beidseitige Interdependenz/Verstärkung/Rückkopplung mit ***arktischer Erwärmung***.



New reality: Earth's climate and nature are already passing tipping points as global warming approaches 1.5°C.

University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report)



⁵⁵⁰ In diesem Sinne etwa die grundlegende Studie von: Francis/Vavrus (2012, Amplification); sowie die nachfolgenden Untersuchungen von Coumou et al. (2018, Amplification); Romanowsky et al. (2019, Stratospheric); sowie Smith et al. (2019, Amplification). Zu Begriff und Hintergrund der „*arktischen Verstärkung*“ vgl. bereits: oben, Kap. 5.2.

⁵⁵¹ Vgl. in diesem Sinne etwa: PIK (2025, Erdsystem); demnach wurde eine Klassifikation der *Jetstream*-Abschwächung als „*mögliches Klimakippelement*“ letztlich „*verworfen*“. Auch der *Weltklimarat* geht in seinem jüngsten Sachstandsbericht nicht mehr explizit auf dieses Thema ein – dies kann auf eine gemäßigtere Problemeinschätzung mit entsprechend tieferem Risikoprofil hindeuten oder aber auch auf einen nach wie vor widersprüchlichen Stand der Forschung; vgl. dazu ausführlich: IPCC (2023, Report).

⁵⁵² In diesem Sinne sehr klar: AWI (2019, Wetterextreme); ESKP (2019, Jetstream).

⁵⁵³ Trotz bestehender Unsicherheiten der Klimaforschung liegt hier die Einschätzung zugrunde, dass die *Jetstream*-Deformation nicht nur einen direkten Einfluss auf die Häufigkeit und Verteilung globaler Extremwetterphänomene ausübt, sondern sich mit weiter steigender Erderwärmung auch progressiv verstärken dürfte.

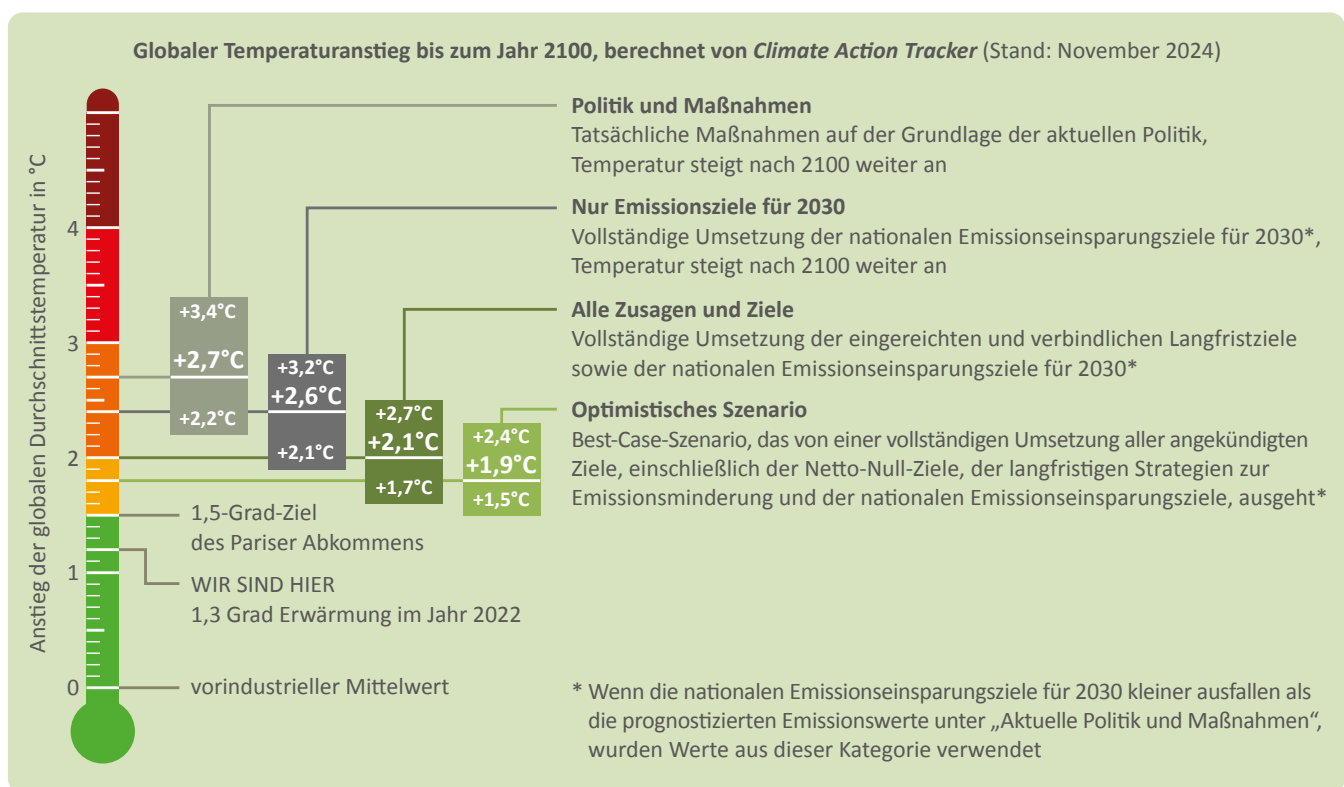
6 WEITREICHENDE FOLGEN DER CLIMATE TIPPING POINTS

6.1 Absehbare Beschleunigung adverser Klimaeffekte

Die Mehrzahl der in jüngerer Zeit vorgelegten Ergebnisse der modernen Klimaforschung zeigt ein **sehr klares Bild**: Der aktuelle Befund, ausgehend vom derzeitigen Stand der Umsetzung vereinbarter Klimaschutzmaßnahmen, deutet nicht nur auf eine weitere Fortsetzung, sondern sogar auf eine **temporäre Beschleunigung** der globalen Erwärmung.⁵⁵⁴ (Vgl. dazu Abb. 63).

Obwohl die Menschheit bereits zahlreiche – und durchaus substantielle – Anstrengungen unternommen hat, um die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren, ist dies bislang im globalen Maßstab noch nicht wirklich gelungen. Der weltweite Ausstoß von Treibhausgasen hat auch 2024 wieder einen **neuen Höchststand** erreicht, und folglich läuft die Dynamik der Erderwärmung – trotz gesteigerter Bemühungen um eine „Green Transition“ – vorerst **nahezu ungebremst** (vgl. Abb. 64).⁵⁵⁵

Abb. 63: Absehbarer Pfad der Erderwärmung je nach Emissionsprofil

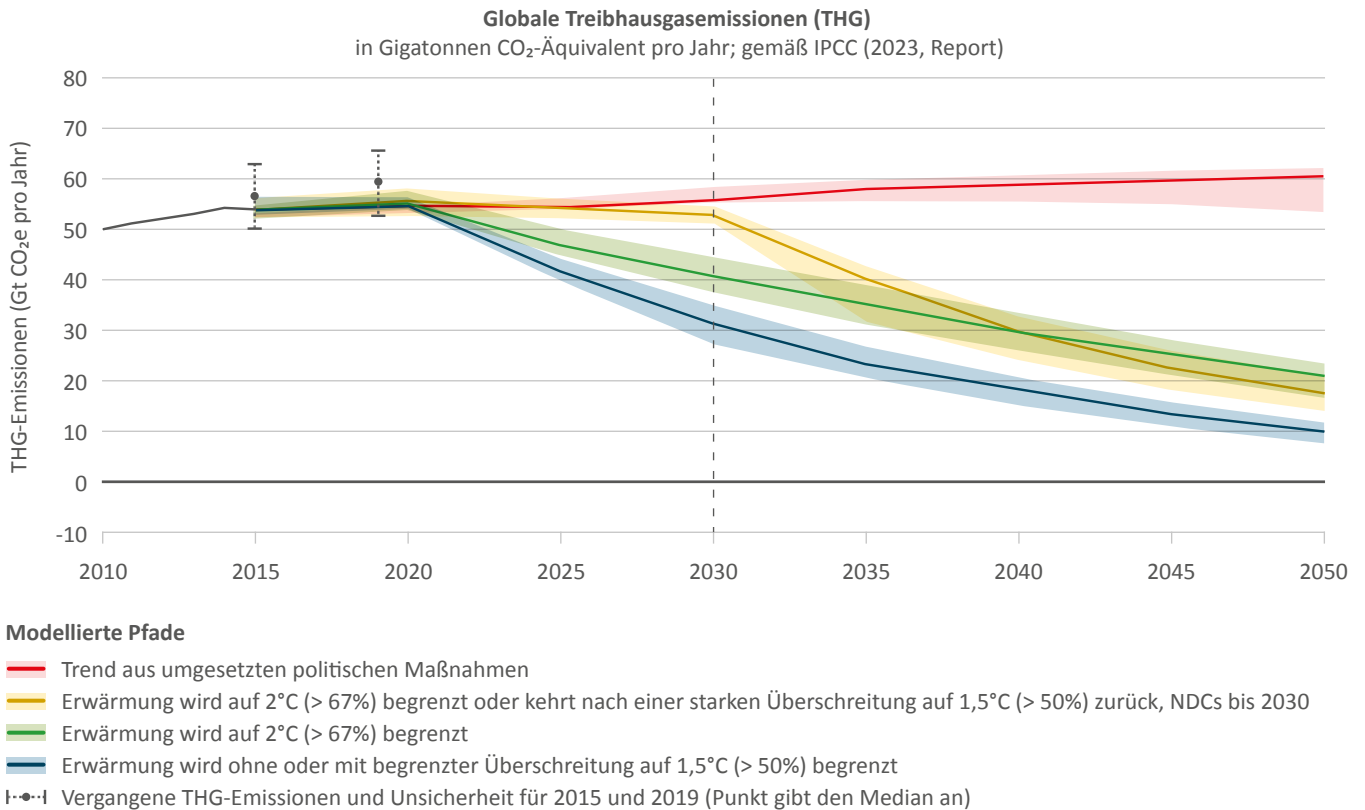


Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung; in Anlehnung an World Ocean Review (2024, Klimakrise), aktuelle Daten von Climate Action Tracker (2025, Thermometer)

⁵⁵⁴ Vgl. dazu stellvertretend die umfassenden Ergebnisse, die im neu erschienenen *Global Tipping Points Report 2025* zusammengefasst und ausgewertet wurden: University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report).

⁵⁵⁵ Vgl. dazu insbesondere die neusten Daten von: Climate Action Tracker (2025, Thermometer).

Abb. 64: Aktueller Verlauf der Treibhausgas-Emissionen und Abweichungen vom Klimaziel



Quelle: IPCC (2024, Synthesebericht) (AR6-WG III, Abb. SPM4)

Verstärktes Monitoring globaler Emissionsprofile und nichtlinearer Kippdynamiken

Derzeit ist noch umstritten, ob die Menschheit bei ihrem Emissionsverhalten klimaschädlicher Treibhausgase bereits in der Nähe eines Hochpunkts und oberen Umkehrpunkts (oder zumindest einer möglichen Plateaubildung) angekommen sein könnte. Entscheidend dafür sind insbesondere die Emissionsprofile der relativ „jungen“ und bevölkerungsreichen Wirtschaftsmächte **China und Indien**, deren Industrialisierungsprozesse noch nicht annähernd abgeschlossen sind.

- ▶ Damit sind – zumindest in Indien – weiter wachsende Nettoemissionen sehr wahrscheinlich, während in China erste Signale auf einen möglichen Höchststand hindeuten könnten (vgl. Abb. 65, S. 132).⁵⁵⁶

Der „scheinbar unaufhaltsame“ Anstieg der Erderwärmung liegt – neben dem anhaltenden Ausstoß von Treibhausgasen – nicht zuletzt daran, dass **heutige Veränderungen** des Erdsystems letztlich auf Emissionen zurückgehen, die schon einige Jahre zurückliegen. Infolge dieser „eingebauten Trägheit“ reagiert das Erdsystem erst mit **spürbarer Verzögerung** auf die massiven menschlichen Eingriffe.⁵⁵⁷

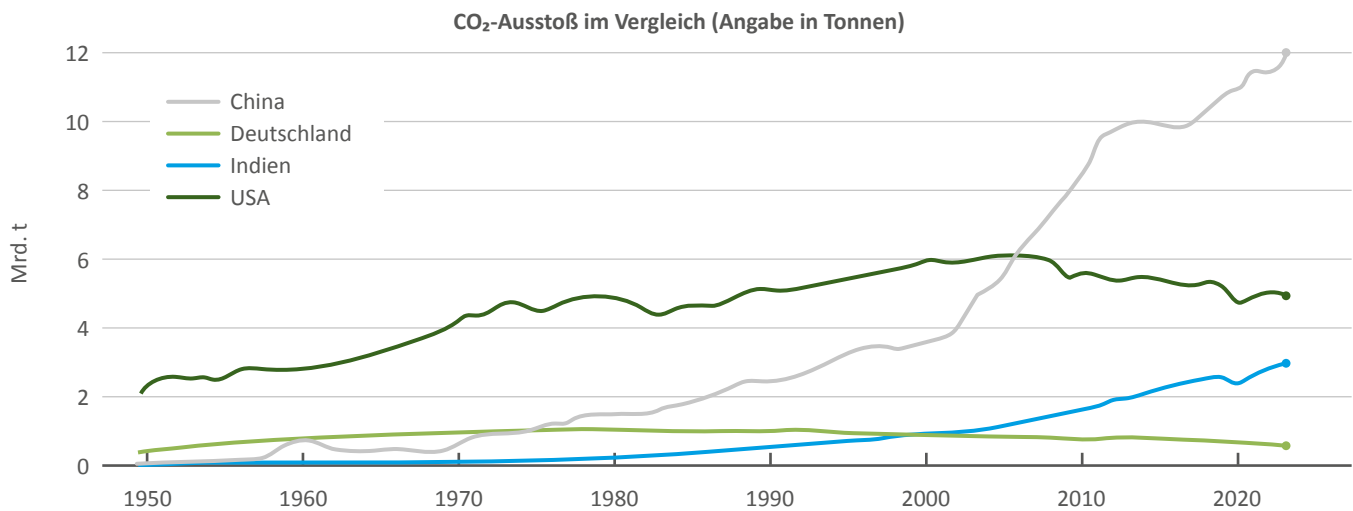
Zudem wird die Relevanz kritischer *Climate Tipping Points* erst seit wenigen Jahren wissenschaftlich erforscht und gewürdigt. Viele Ergebnisse und Implikationen daraus haben deshalb noch nicht hinreichend – oder mit der **erforderlichen Dringlichkeit** – Eingang in die gesellschaftliche Erkenntnisbildung und die Systematik politischer Entscheidungsprozesse gefunden.⁵⁵⁸

⁵⁵⁶ Vgl. in diesem Sinne etwa: ntv (2025, CO₂-Zenit): „... einer Analyse der britischen Recherche-Plattform Carbon Brief zufolge (...) hat China im ersten Quartal 2025 erstmals weniger CO₂ ausgestoßen als in den Monaten zuvor.“

⁵⁵⁷ Vgl. zu diesem Zusammenhang bereits ausführlich: oben, Kap. 4.2.

⁵⁵⁸ Dieser Aspekt ist von großer Wichtigkeit. Er erklärt, warum etwa die hinter den *Global Tipping Point Reports* stehenden Klimawissenschaftler ihre Forschungsergebnisse nun sehr gezielt in die Öffentlichkeit tragen.

Abb. 65: Globales Emissionsprofil zunehmend geprägt durch China und Indien



Quelle: ntv (2025, CO₂-Zenit); Daten von Global Carbon Budget (2024)

Hinzu kommt noch ein weiterer Aspekt:

- ▶ Offensichtlich haben viele der anfänglichen Klimamodelle den **Effekt multipler Interdependenzen** und dezidiert **nichtlinearer Veränderungen** innerhalb des komplexen globalen Klimasystems deutlich unterschätzt – oder nicht adäquat berücksichtigt.⁵⁵⁹

Dieses Versäumnis ist teilweise bedingt durch unzureichende Leistungsfähigkeit der jeweils verfügbaren Computersysteme, oftmals aber auch durch **mangelndes Verständnis** (oder „Ausblenden“) komplexer Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Elementen und Wirkungsmechanismen des Erdsystems. Die gute Nachricht dabei ist:

- ▶ Inzwischen sind die **komplexen Interdependenzen** innerhalb des Erdsystems wesentlich besser erforscht, analysiert und akzeptiert als noch vor einigen Jahren. Das zeigt sich nicht zuletzt im wachsenden Verständnis für die Kritikalität der *Climate Tipping Points*.⁵⁶⁰

- ▶ Gleichzeitig stehen der Klimaforschung inzwischen **geeignete Hochleistungscomputer** zur Verfügung, um auch komplexe Erdsystemmodelle mit ihren Unsicherheiten und Nichtlinearitäten umfänglich rechnen zu können.⁵⁶¹

Sowohl die zunehmende „Rechenpower“ als auch das deutlich **besser entwickelte Verständnis** für die Komplexität und systemische Dynamik des Erdklimas – unterstützt durch oftmals deutlich **verbesserte Messmethoden** etwa mit Hilfe spezieller Satellitenbeobachtung – führen jedoch letztlich zu einem eindeutigen Bild:

- ▶ Der Prozess der Erderwärmung läuft vorerst progressiv weiter – und das **kritische 1,5°C-Ziel** des *Pariser Klimaabkommens* befindet sich bereits in **unmittelbarer Nähe!**⁵⁶²
- ▶ Selbst wenn alle Unterzeichner des *Pariser Klimaabkommens* ihre gemachten Zusagen vollständig einhalten würden (was derzeit wenig realistisch erscheint), ist die Welt auf dem **Pfad zu einer Erwärmung um rund 2,7°C** bis spätestens Ende des Jahrhunderts!⁵⁶³

⁵⁵⁹ Darauf deuten viele neuere Ergebnisse komplexerer Modellierungen hin; dieser wichtige Aspekt wurde im Rahmen der vorliegenden Analyse mehrfach (in unterschiedlichen Kapiteln) ausgeführt.

⁵⁶⁰ Dies zeigt sich im Gesamtbild der vorliegenden Analyse. Vgl. dazu jedoch ergänzend auch die entsprechenden *Global Tipping Points Reports* der *University of Exeter*, sowie die jüngsten *Sachstandsberichte* des *Weltklimarats*, wie z.B. IPCC (2023, Report). Im nächsten *Sachstandsbericht (AR7) – IPCC (2026)* – soll der Problematik der *Climate Tipping Points* ein eigenständiges Kapitel gewidmet werden (IPCC AR7, WG1, Kap. 8); vgl. dazu: IPCC (2026, Report); (noch ausstehend).

⁵⁶¹ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 3.2.1 und 3.2.3.

⁵⁶² Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 2 und 3.

⁵⁶³ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 2 und 3.



*We are in the midst of a climate emergency,
and the window to act is closing fast.*

UNEP (2024, Gap)



Näherrücken kritischer Climate Tipping Points

Somit ist die derzeitige Ausgangslage im globalen Klimasystem offensichtlich bereits **sehr fragil**, denn aus den jüngsten Einschätzungen des *Weltklimarates* folgt klar,

- ▶ „... dass die Erde bereits einen ‚sicheren‘ Klimazustand verlassen haben könnte, wenn die Temperaturen eine Erwärmung von etwa 1°C überschreiten.“⁵⁶⁴

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2022) erklärt zu dieser kritischen Entwicklung:

- ▶ „Selbst beim derzeitigen Stand der globalen Erwärmung besteht bereits die Gefahr, dass im Erdsystem **fünf gefährliche Klima-Kippunkte überschritten werden** – und die Risiken steigen mit jedem Zehntelgrad weiterer Erwärmung.“⁵⁶⁵

Und weiter:

- ▶ „Im Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) heißt es, dass das Risiko des Auslösens von Klima-Kippunkten bei etwa 2°C über den vorindustriellen Temperaturen **hoch** und bei 2,5 bis 4°C **sehr hoch** wird.“⁵⁶⁶

Besonders beunruhigend: Die genannten Schätzungen und Annahmen haben sich zuletzt – innerhalb eines Zeitraums von **weniger als zwei Jahren!** – bereits deutlich verschärft: Demnach könnten „... bei einer Erderwärmung von 1,5 Grad in den 2030er-Jahren **neben fünf bereits bedrohten sogenannten Kippssystemen drei weitere bedroht sein**.“⁵⁶⁷

Diese bedrohliche Ausgangslage wird durch die spezielle Dynamik des globalen Klimasystems noch weiter verschärft, denn: Aktuelle Ergebnisse komplexer Klimamodelle deuten auf eine **weitere Beschleunigung** diverser Kippdynamiken, insbesondere aufgrund (bislang offensichtlich häufig unterschätzter) **nichtlinearer Interdependenzen** und sich **gegenseitig verstärkender Interaktionen** wichtiger **Kippelemente** im globalen Klimasystem.⁵⁶⁸ (Vgl. dazu Abb. 66, S. 134).

Auch zu dieser Problematik gibt es inzwischen einen klaren (wenngleich sehr beunruhigenden) Befund:

- ▶ „Viele Kippelemente im Erdsystem sind miteinander verknüpft, was Kippunkte zu einem ernsthaften zusätzlichen Problem macht. **Tatsächlich können Wechselwirkungen zwischen diesen Elementen die kritischen Temperaturschwellen für manche dieser Elemente senken**, ab denen einzelne Kippelemente sich dann langfristig zu destabilisieren beginnen.“⁵⁶⁹



*Die Gefahr, dass Extremereignisse
gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig
in ihren Auswirkungen verstärken,
steigt im Zuge des Klimawandels.*

World Ocean Review (2024, Klimakrise)



⁵⁶⁴ Kernaussage von IPCC (2023, Report); zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte).

⁵⁶⁵ PIK (2022, Klima-Kippunkte); unter Bezugnahme auf die Originalstudie von: Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points); (Hervorhebungen durch Verfasser).

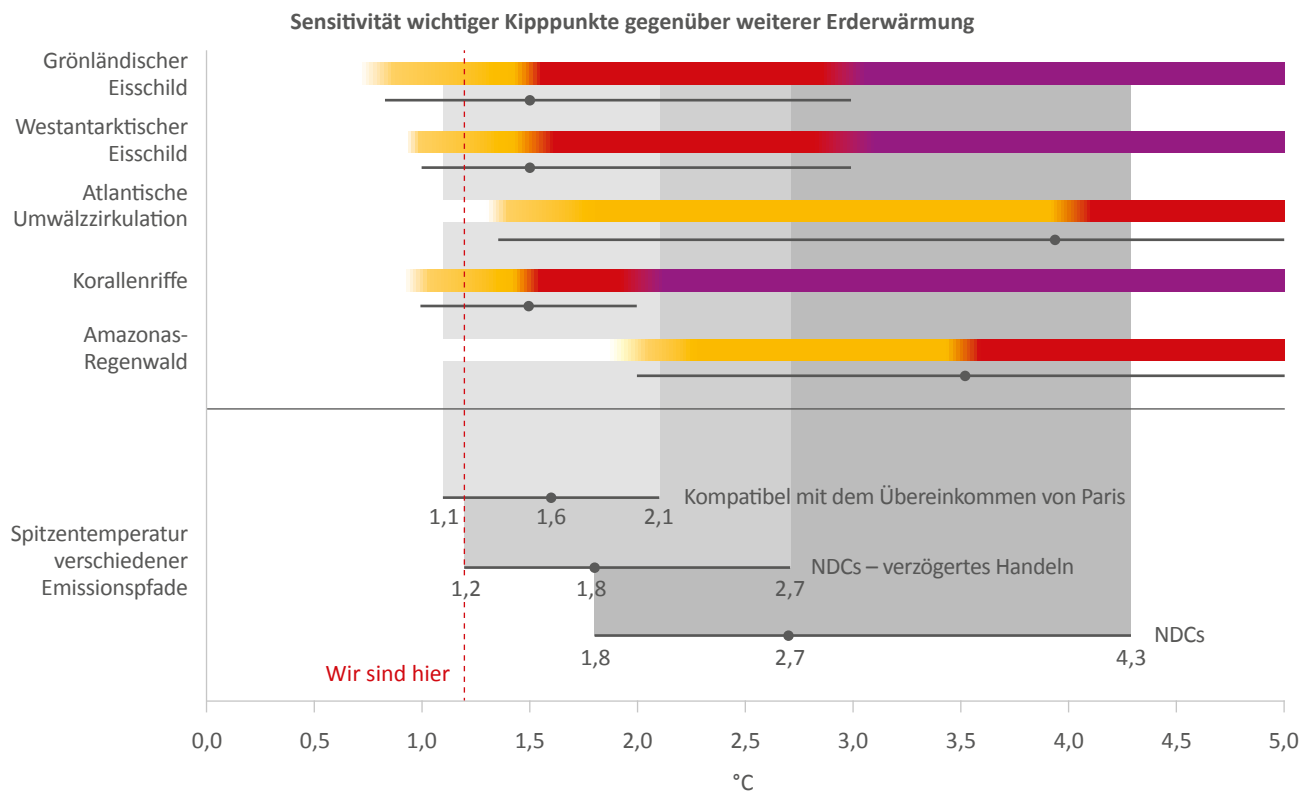
⁵⁶⁶ PIK (2022, Klima-Kippunkte); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁵⁶⁷ Zeit (2023, Kippunkt); (Hervorhebungen durch Verfasser); unter Verweis auf Aussagen von Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

⁵⁶⁸ Vgl. dazu den Grundtenor der vorliegenden Analyse, sowie explizit auch: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report). Der häufig wiederkehrende Befund eines systematischen „*Unterschätzens*“ kritischer Klimaprozesse deutet auf eine grundsätzliche Tendenz, die wohl oftmals aus reduzierten (zu stark vereinfachten) Modellannahmen und folglich „*unterkomplexen*“ Modellierungen resultiert; vgl. dazu grundsätzlich bereits: oben, Kap. 3.2.1 und 3.2.3; sowie explizit: MPI-M (2024, Klimaprojektionen).

⁵⁶⁹ Ricarda Winkelmann, Klimaforscherin am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte).

Abb. 66: Thermische Sensitivitäten wichtiger Klimakippelemente



Kippunkte der fünf dringlichsten Kippelemente, gemäß IPCC (2023, Report)

— Unsicherheitsspanne • Zentraler Schätzwert

Quelle: Umweltbundesamt (2024, Kippdynamiken); (Temperaturdaten teilweise überholt)

Einen guten Überblick über den aktuellen Stand der Forschung, insbesondere zu den **kritischen Erwärmungswerten** wichtiger Kippelemente und deren (bis vor kurzem noch) **unterstellter Zeitskala**, bietet Tab. 2, angelehnt an *Armstrong McKay et al. (2022)*.

Dabei gilt grundsätzlich: je niedriger der jeweilige Schwellenwert für den kritischen Temperaturanstieg, desto größer das Risiko für ein „Auslösen“ der zugehörigen Kippunkte – und **desto näher deren zeitliche Eintrittsrisiken** („Zeitskala“). Die Bereiche, in denen derzeit relativ **hohes Vertrauen** in die Zuverlässigkeit der Schätzungen besteht, sind in der Tabelle **grün** unterlegt (rot entsprechend: erhebliche Unsicherheit).

▶ Allerdings deuten neuere Forschungsergebnisse inzwischen bereits in mehreren Bereichen der Tabelle auf eine **weitere Verschärfung** – sowohl hinsichtlich der kritischen **Temperaturen** als auch der erwarteten **Zeitskala** sowie weiterer klimarelevanter **Auswirkungen**.⁵⁷⁰

Dazu erklärt etwa auch *OECD (2022)* in einem Sonderbericht zum Thema der *Climate Tipping Points*:

▶ „In fact, it is increasingly understood that some tipping points may be crossed at lower thresholds, and **thus far sooner, than previously thought**, with potentially devastating consequences already this century.“⁵⁷¹

“
Passing 1.5°C and certainly 2°C risks tipping several other systems, locking in change for centuries to come.
 ”

Global Tipping Points (2023, Report)

⁵⁷⁰ Vgl. dazu summarisch: University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report).

⁵⁷¹ OECD (2022, Climate Tipping Points), S. 40.

Tab. 2: Zeitliche und thermische Kritikalität der wichtigsten Climate Tipping Points

	Kippelemente 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
	Ostantarktisches subglaziales Becken (Kollaps)	3.0	2.0	6.0	2k	500	10k	0.05	?
	Arktisches 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 Umwälz-Zirkulation (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 gesamt/ 0.2°C"	0.4 bis 2.0
	Borealer Permafrost (Kollaps)	4.0	3.0	6.0	50	10	300	0.2 bis 0.4	--

Quelle: CCCA (2024, Kippunkte); in Anlehnung an Armstrong McKay (2022, Climate Tipping Points)

Gleichzeitig zeigen sich in einigen der besonders kritischen Bereiche sowie deren zugehörigen Kippelementen nach Einschätzung führender Klimaexperten bereits **ernstzunehmende Frühwarnsignale** für eine möglicherweise beginnende Kippdynamik:

- „Potential **early warning signals of the Greenland ice sheet, Atlantic Meridional Overturning Circulation, and Amazon rainforest destabilization have been detected.**“⁵⁷²

Diese grundsätzliche Ausgangslage sowie die **Aussicht auf eine anhaltende Beschleunigung der Erderwär-**

mung – mit äußerst disruptiven Folgewirkungen – sind aus Sicht der Menschheit alles andere als beruhigend. Denn:

- Kritische Klimaphänomene und Ereignisse, die bislang als zwar „**folgeschwer**“, aber nur „**wenig wahrscheinlich**“ interpretiert wurden („**high impact – low probability**“), verändern sich nun in ihrer Wertigkeit rapide in „**zunehmend wahrscheinliche**“ und „**potentiell katastrophale**“ Ereigniskaskaden („**high impact – high probability**“).⁵⁷³

⁵⁷² Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points); (Hervorhebungen durch Verfasser). Ergänzend dazu auch: Boers/Rypdal (2021, Tipping Point); van Westen et al. (2024, Tipping Course). Vgl. mit Blick auf die akute Kippdynamik des Antarktis-Eisschildes auch die neue Untersuchung von: Abram et al. (2025, Antarctic).

⁵⁷³ Vgl. dazu weiterführend: unten, Kap. 6.2; sowie dort auch Info-Box zum Thema „*Planetary Solvency*“.

Das zentrale Problem sowie die in den letzten Jahren **zunehmend verschärfte Risikoeinschätzung** verdeutlicht explizit auch nachfolgendes Resümee des *Global Tipping Points Report* (2023):

*„Things really are bad. Devastating climate events and nature loss are here today. We are no longer talking about tomorrow’s problem. This is with **average warming of 1.2 degrees Celsius**. Under current policies we are on a **trajectory of warming beyond 2°C**, which will have an impact **exponentially greater than what we face today**.*

*But it is worse than this. As warming approaches and surpasses 2 degrees Celsius **this may cause critical Earth system tipping points**, once considered low-likelihood, to **rapidly become much higher-likelihood events**.*

*These harmful discontinuities pose **some of the gravest threats faced by humanity**. Consider for example the runaway collapse of the Greenland and Antarctic ice sheets, which will redefine coastlines worldwide. Or the possibility of the dieback of the Amazon forest, causing it to tip into a savannah-like ecosystem. Already at 1.2 degrees Celsius of warming, warm-water coral reef ecosystems [are] at risk of unravelling.*

*Passing 1.5°C and certainly 2°C risks tipping several other systems, **locking in change for centuries to come**.“⁵⁷⁴*



Every region faces more severe and/or frequent compound and cascading climate risks.

IPCC (2023, Report)



6.2 Gravierende ökologische und ökonomische Konsequenzen

Werden die Kernaussagen ganzheitlicher und systemdynamisch angelegter Klimaanalysen – wie etwa exemplarisch in den *Global Tipping Points Reports* – konsequent zu Ende gedacht, dann ergeben sich daraus äußerst **schwierige Ableitungen** für die weitere Entwicklung des Planeten Erde.

Das weitere Fortschreiten der globalen Erwärmung auf einem Pfad, der aller Wahrscheinlichkeit nach (mindestens) in Richtung 2,7°C führt, erzeugt zwangsläufig eine **Vielzahl sehr negativer Klimafolgen**. Diese interagieren in Form komplexer, nichtlinearer Systemdynamiken, was wiederum die **Dimension der möglichen Gesamteffekte – und deren klar absehbare Klimawirkungen – potenziert**.⁵⁷⁵

Hierzu warnt *Johan Rockström*, Direktor am *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung* (2022):

- ▶ *„Die Welt steuert auf eine globale Erwärmung von 2-3°C zu. Damit ist die Erde geradewegs auf Kurs, **mehrere gefährliche Schwellenwerte zu überschreiten**, die für die Menschen auf der ganzen Welt **katastrophale Folgen** haben würden.“⁵⁷⁶*

Diese rasch fortschreitende Systemdynamik hat schon heute sehr klar erkennbare Folgen, die sich nicht zuletzt in einer rapide **abnehmenden planetaren Biodiversität** niederschlagen: Schätzungen zufolge gingen in den letzten rund 50 Jahren bereits **mehr als zwei Drittel aller Arten** verloren!⁵⁷⁷

⁵⁷⁴ University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 6; (Hervorhebungen durch Verfasser). [Anm. d. Verf.: Die hier zitierten Temperaturwerte haben sich inzwischen weiter erhöht und liegen nun – statt bei 1,2°C – **bei durchschnittlich 1,35°C** (1,34-1,41); vgl. dazu etwa: WMO (2025, Climate); Climate Action Tracker (2025, Thermometer)].

⁵⁷⁵ Vgl. dazu ausführlich: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report) und (2025, Report). Vgl. dazu auch bereits: oben, Kap. 6.1 (Textbox *Global Tipping Points Report*).

⁵⁷⁶ *Johan Rockström*, Klimaforscher und Direktor des *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung*, zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kipppunkte); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁵⁷⁷ Vgl. University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 79; unter Verweis auf: WWF (2022, Planet). Vgl. dazu ausführlich auch: Biber et al. (2024, Biodiversität); sowie ergänzend: WWF (2024, Planet).

Unter dem relativ neuen Begriff der „**Planetaren Solvenz**“ (**Planetary Solvency**) versuchen sowohl Klimawissenschaftler als auch Wirtschaftsexperten seit einiger Zeit, die zunehmenden (und sich oftmals nichtlinear verstärkenden) Klimarisiken besser zu verstehen und zu quantifizieren. Die oftmals noch massiv unterschätzten (oder sogar ignorierten) Folgewirkungen des Klimawandels sollen dabei klarer erfasst und in **ökonomische Kategorien** („Kosten“) sowie in **stringente Risikometriken** „übersetzt“ werden.⁵⁷⁸

► „**Planetary Solvency is a global risk management methodology.**“⁵⁷⁹

Damit soll das Konzept der *Planetary Solvency* insbesondere **politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger** näher an die (oftmals schwer verständliche) Realität abrupter und immer stärker werdender Klimaschäden heranführen und so „bessere Entscheidungen“ ermöglichen.

Ziel dieser Ansätze ist ein deutlich **verbessertes (Risiko-) Management** von planetaren Klimarisiken, um die schon heute erkennbaren und oftmals unumkehrbaren Folgewirkungen der Erderwärmung bestmöglich bewältigen – oder im Idealfall sogar teilweise vermeiden – zu können.



“Policymakers must implement realistic and effective approaches to global risk management.”

Timothy Lenton, Klimaexperte, 2025



Klimawandel erzeugt Vielzahl komplexer Folgewirkungen

Mit Blick auf die weitere Entwicklung resultieren besonders gravierende Konsequenzen im Hinblick auf bestehende planetare Ökosysteme, die eine zentrale Grundlage für die **Ernährung und das ökonomische Wohlergehen** von Milliarden von Menschen bilden. Hierbei geht es (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) insbesondere um folgende Aspekte:

- Weiträumige Einschränkungen der **Trinkwasserversorgung** und beim Zugang zu Süßwasser
- Zunehmende **Überflutung** küstennaher Gebiete und Metropolen (Hafenstädte etc.)
- Abrupter Anstieg **lebensfeindlicher Klimabedingungen** in dicht bevölkerten Regionen
- Starke Reduktion potentieller **Nahrung aus Ozeanen** (Fisch, Proteine etc.)
- Massiver und großvolumiger **Einbruch der globalen Nahrungsmittelproduktion**
- Erhöhte Gesundheitsrisiken durch **Überhitzung** und potentiell neue **Krankheitserreger**
- Höhere **Sterblichkeit** von Risikogruppen und älteren Menschen durch Hitze und Feuchte
- Deutliche Zunahme von **Extremwetterereignissen** mit hohen Schadensrisiken
- Vermehrte **Infrastrukturschäden** durch Waldbrände, Überflutung und Permafrost-Tauen
- Negative Auswirkungen auf viele Flusssysteme und **flussgebundene Transportwege**
- Signifikante Degradation (oder Verlust) **landwirtschaftlicher Anbauflächen** für „existenzielle“ Lebensmittel (Reis, Getreide etc.)

⁵⁷⁸ Anschauliche Beispiele dafür bieten entsprechende Analysen und Konzepte von Aktuars-Vereinigungen und anderen „dedizierten Risikomanagern“ wie etwa Versicherungen oder Rückversicherungen. Vgl. dazu beispielhaft etwa: IFoA (2024, Scorpion); IFoA (2025, Solvency).

⁵⁷⁹ IFoA (2025, Solvency), S. 8; (Hervorhebungen im Original). Vgl. dazu weiterführend auch: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report).

Schon diese kurze Liste lässt deutlich erkennen, welche **geballete Vielzahl** und welches **breite Spektrum** an äußerst problematischen (oder unmittelbar krisenhaften) Ereignissen und Entwicklungen in einem auf mindestens 2-3°C Erwärmung zusteuernden Weltklimasystem zu erwarten sind. *Global Tipping Points Report (2023)*, der zahlreiche Studien, Modellrechnungen, Beobachtungen und weiterführende Erkenntnisse zum Klimawandel systematisch zusammenführt, erklärt dazu:

- ▶ „*Earth system destabilisation and tipping points can have far-reaching and catastrophic consequences across various critical sectors. (...) Such changes carry the potential for severe impacts on people and ecosystems, including major impacts on water, food, energy security, health, communities and economies.*“⁵⁸⁰

Mit klarer Bezugnahme auf die *Climate Tipping Points* sowie die komplexen Interdependenzen zwischen Natur, Klima und menschlicher Daseinsvorsorge mahnt auch *WWF (2024)*:

- ▶ „*In the face of looming regional and global tipping points, it’s never been more urgent to recognize the interconnectedness of nature, climate and human well-being and to tackle these goals in a coordinated way.*“⁵⁸¹



Die Kosten des Klimawandels für Wirtschaft und Gesellschaft werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten immens sein.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2024, Kosten)



Diese Zusammenhänge und deren mögliche Konsequenzen – nicht zuletzt auch auf das bisherige **System der Weltwirtschaft** und viele nachgelagerte Bereiche – sind prinzipiell klar abschätzbar und vielfach auch bereits in der aktuellen Realität erkennbar. Sie finden seit Jahren auch ihren regelmäßigen Niederschlag in der Berichterstattung des *Weltklimarats (IPCC)* und anderer nationaler oder multinationaler Institutionen.⁵⁸²

- ▶ Immer deutlicher treten dabei die „**ökonomischen Kosten des Klimawandels**“ hervor: Diese haben sich nach Einschätzung von *WEF (2024)* in den letzten 20 Jahren bereits mehr als verdoppelt („*Climate-related economic costs have more than doubled over the past 20 years*“).⁵⁸³
- ▶ Vor dem Hintergrund der **verstärkten Relevanz und Kritikalität** globaler *Climate Tipping Points* werden diese Kosten aber in naher Zukunft noch weitaus dynamischer ansteigen.⁵⁸⁴

Klimapolitische Sorglosigkeit erhöht künftige Kosten

Trotz der inzwischen sehr breiten Wissensbasis und einer relativ starken Präsenz, die regelmäßig auch anlässlich der sogenannten *COP-Klimakonferenzen* gegeben ist, scheinen diese gravierenden Szenarien aber noch immer nicht ausreichend, um den Kampf gegen die globale Erwärmung wirklich mit voller Entschlossenheit zu führen. Im Gegenteil entscheiden sich führende Emittenten von Treibhausgasen, wie die USA unter *Donald Trump*, diesen Kampf gänzlich einzustellen.⁵⁸⁵

Und nicht nur das: Wie *Blyth/Driscoll (2025)* explizit nachweisen, versuchen die USA – als einer der Hauptverursacher der bisherigen Erderwärmung – unter der zweiten *Trump*-Regierung sogar, den Trend zur Dekarbonisierung nicht nur im eigenen Land umzukehren, sondern durch massiven wirtschaftlichen und politischen Druck auch weltweit aufzuhalten:

- ▶ „*Es wird immer deutlicher, dass die Trump-Regierung die Dekarbonisierung nicht nur in den USA, sondern weltweit stoppen will.*“⁵⁸⁶

⁵⁸⁰ University of Exeter, *Global Tipping Points (2023, Report)*, S. 176. Die Frage der potentiellen „*menschlichen Kosten*“ behandeln vertieft auch: Lenton et al. (2023, *Human Cost*).

⁵⁸¹ *WWF (2024, Planet)*, S. 48; (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁵⁸² Vgl. dazu ausführlich die unterschiedlichen Berichte und Formate unter: *IPCC (2025, Reports)*; aber auch einschlägige Analysen und Berichte etwa von *World Economic Forum (WEF)* oder *World Wildlife Fund (WWF)*. Vgl. dazu beispielhaft: *WEF (2025, Climate Action)*; *WWF (2024, Planet)*.

⁵⁸³ Vgl. dazu ausführlich: *WEF (2024, Inaction)*; (Zitat: S. 11).

⁵⁸⁴ Diese Annahme ist auf Basis neuester Forschungsergebnisse – und auch der hier durchgeführten Analyse – sehr klar begründbar; vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 4-5; sowie 6.1.

⁵⁸⁵ Vgl. dazu etwa: *ntv (2025, USA)*. Die *COP*-Konferenzen sind die weltweit bedeutendste Koordinationsplattform beim Kampf gegen den Klimawandel (*COP* steht dabei für *Conference of the Parties*).

⁵⁸⁶ *Blyth/Driscoll (2025, Dekarbonisierung)*.

Diese **klimapolitische Ignoranz und Irrationalität** ist nur schwer zu verstehen, denn die globale Erwärmung hat – neben den bereits ausführlich erörterten direkten Klimafolgen – auch enorme **ökonomische und finanzielle Implikationen**: Zusätzlich zu den rein klimabedingten Schäden würden dabei, als unmittelbare oder nachgelagerte Effekte, auch bisherige (oftmals hoch spezialisierte) **Wirtschaftssysteme** und **globale Transaktionsnetze** stark in Mitleidenschaft gezogen – oder für lange Zeit zerstört!

- ▶ Ganze **Sektoren moderner Wirtschaftssysteme** wie Landwirtschaft, Fischerei, Energieerzeugung, Nahrungsmittelproduktion, Transport und Logistik, Tourismus und viele andere könnten dabei ganz oder in Teilen ihre Existenzgrundlagen verlieren.⁵⁸⁷
- ▶ Hinzu käme für viele Volkswirtschaften noch **Druck durch globale „Klimaflüchtlinge“**, die versuchen würden, aus überhitzten, vertrockneten, unfruchtbaren oder überflutungsbedrohten Gegenden in klimatisch günstigere Regionen umzusiedeln.



... die rasche Erwärmung der Erde und die zunehmende Umweltzerstörung bedrohen jeden Sektor der Weltwirtschaft.

McCarthy/Odier (2025, Finanzrisiken)



Schon diese Aspekte würden genügen, um in der heutigen hochintegrierten und ökonomisch zunehmend fragilen Welt **enormen ökonomischen Stress** auszulösen. Zusätzlich wären aber auch noch die direkten Kosten zu tragen, die exponier-

ten Volkswirtschaften aus zunehmenden **Extremwetterereignissen** (wie Dürreperioden, Wirbelstürmen, Überschwemmungen, Flutkatastrophen etc.) entstehen würden.⁵⁸⁸

Besonders hart an dieser Perspektive:

- ▶ **Erstmals würden derartige Krisenszenarien abrupt, konzentriert, hochdynamisch, selbstverstärkend, ineinandergreifend, überlagernd und verdichtet in einer relativ kurzen Zeitspanne auf eine globale Bevölkerung von rund 9 Mrd. Menschen treffen!**

Speziell dieser Aspekt macht deutlich, dass in der breiten Öffentlichkeit das Problem einer **exponentiellen Kumulation und Konzentration unterschiedlichster Klimarisiken**, die sich innerhalb einer relativ kurzen Phase – während nur zwei bis drei Generationen! – global und übergreifend materialisieren, noch immer massiv unterschätzt wird.⁵⁸⁹

In einer deutlich formulierten Einschätzung erklärt dazu der *Weltklimarat IPCC* (2023):

- ▶ „Every region faces more severe and/or frequent compound and **cascading climate risks**.“⁵⁹⁰

In einem Sonderbericht zum Problem der *Climate Tipping Points* beklagt auch *OECD* (2022) das bislang oft noch völlig unzureichende Verständnis für die **möglichen Gesamteffekte**, die aus einer **zeitlichen Überlagerung und gegenseitigen Verstärkung unterschiedlicher Folgen des Klimawandels** resultieren können – ausgelöst oder intensiviert insbesondere durch das **„Umkippen“ kritischer Klimatelemente**:

- ▶ „However, current modelling of the economic costs of climate change generally do not consider the **possibility of large-scale singular events such as tipping elements**“⁵⁹¹

⁵⁸⁷ Vgl. dazu ausführlich die jeweiligen Schlussfolgerungen und Szenario-Darstellungen bei University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 171-192; University of Exeter, *Global Tipping Points* (2025, Report); sowie: IPCC (2019, Climate); IPCC (2023, Report), (speziell S. 97-101).

⁵⁸⁸ Vgl. dazu auch die sehr aktuelle und umfassende Einschätzung von: McCarthy/Odier (2025, Finanzrisiken). In diesem Sinne auch: Usman et al. (2025, Impact); Tagesschau (2025, Extremwetter).

⁵⁸⁹ Die Autoren der Studie zu den möglichen Kosten des Klimawandels, Kotz et al. (2024, Commitment), bieten dafür jedoch eine mögliche Erklärung, die eng mit der menschlichen Psyche verknüpft ist: „Projections of future damages meet challenges when informing these debates, in particular the human biases relating to uncertainty and remoteness that are raised by long-term perspectives.“

⁵⁹⁰ IPCC (2023, Report), S. 100; (Hervorhebungen durch Verfasser). Zwangsläufig ergeben sich daraus direkte und möglicherweise sehr „brutale“ Rückwirkungen auf grundlegende menschliche Umwelt- und Lebensbedingungen; vgl. dazu ausführlich auch: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report).

⁵⁹¹ OECD (2022, *Climate Tipping Points*), S. 40; (Hervorhebungen durch Verfasser).

Die daraus grundsätzlich resultierende Problematik – als **Kumulation und Interaktion** völlig unterschiedlicher, aber dennoch eng miteinander verknüpfter Klimarisiken – verdeutlicht folgende mahnende Einschätzung von IPCC (2023):

- ▶ „Climate-driven **food insecurity and supply instability**, for example, are projected to increase with increasing global warming, interacting with non-climatic risk drivers such as **competition for land** between urban expansion and **food production, pandemics and conflict**.“⁵⁹²

Zu diesem grundlegenden und offenkundigen Versäumnis tradierter Wirtschafts- und Kapitalmarktmodelle, schnell näher rückende – und teilweise bereits akut drohende – „Klimakosten“ adäquat abzuschätzen und „einzupreisen“, erklärt OECD (2022):

- ▶ „... existing [economic] estimates **still overlook some tipping point impacts and possible interactions** and are thus likely still **too optimistic**.“⁵⁹³

Noch deutlicher wird der renommierte Klimaexperte *Timothy Lenton*, der Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft eine **eklatante Unterschätzung schwerwiegender Klimarisiken** attestiert – nicht zuletzt aufgrund von Unkenntnis oder Ignoranz systemischer *Tipping Point*-Risiken:

- ▶ „High-profile climate change assessments in wide use **significantly underestimate risk** as they exclude many of the most severe risks we could face.“⁵⁹⁴

Vor diesem Hintergrund gewinnen **Versuche zur Quantifizierung** potentieller Klimaschäden an Relevanz. Obwohl diese naturgemäß mit vielen Unsicherheiten sowie zahlreichen Zuordnungs- und Berechnungsproblemen behaftet sind, ermögli-

chen sie eine bessere Bewertung drohender Klimaschäden sowie latenter „Kosten des Nichthandelns“ (vgl. dazu Abb. 67).⁵⁹⁵



A key priority (...) is the need to improve the link between economic and geophysical modelling.

OECD (2022, Climate Tipping Points)



Die möglichen (ökonomischen) Kosten einer weiteren Fortsetzung und Verschärfung dieser Klimarisiken beziffert das *Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung* (2025) bis zum Jahr 2050 auf dann **rund 32 Bio. USD pro Jahr** und folgert:

- ▶ „Die weltweite Wirtschaftsleistung könnte Mitte dieses Jahrhunderts um 17 Prozent niedriger sein als ohne weiteren Klimawandel.“ Und weiter:
- ▶ „Die jährlichen globalen Klimaschäden zur Mitte dieses Jahrhunderts sind (...) **fünffmal so groß** wie die Vermeidungskosten zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf zwei Grad.“⁵⁹⁶

Die Leiterin der zugrundeliegenden Untersuchung, *Wenz* (2024), erklärt dazu weiter:

- ▶ „Unsere Studie zeigt, dass der Klimawandel **innerhalb der nächsten 25 Jahre** in fast allen Ländern der Welt **massive wirtschaftliche Schäden** verursachen wird, auch in Ländern wie Deutschland, Frankreich und den Vereinigten Staaten.“⁵⁹⁷

⁵⁹² IPCC (2023, Summary); dort mit zahlreichen weiteren Ausführungen zur Problematik; ähnlich auch: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report). Mit ähnlicher Grundaussage auch: WEF (2024, Inaction).

⁵⁹³ OECD (2023, Climate Tipping Points), S. 43.

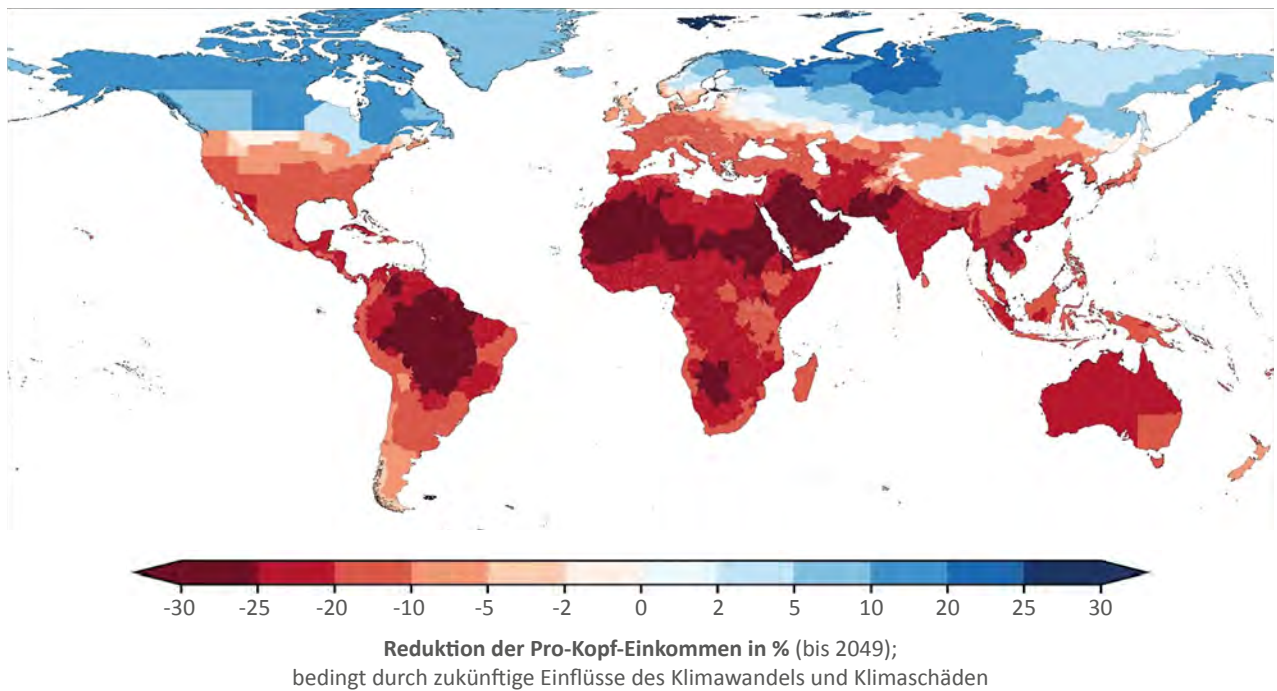
⁵⁹⁴ *Timothy Lenton*, Experte für Klimakippunkte, Professor an der *University of Exeter* und Leiter des *Global Systems Institute*, zitiert nach: IFoA (2025, Solvency), S. 7 (Vorwort).

⁵⁹⁵ Vgl. dazu ausführlich: Kotz et al. (2024, Commitment); sowie eine spätere Korrekturversion unter: Kotz et al. (2025, Correction). [Anm. d. Verf.: Ergebnisse und Methodik der ursprünglichen Studie wurden nach Publikation nochmals neu berechnet und teilweise modifiziert]. Vgl. dazu auch: PIK (2025, Klimaschäden).

⁵⁹⁶ PIK (2025, Klimaschäden); (Hervorhebungen durch Verfasser); unter Bezugnahme auf die Originalstudie von: Kotz et al. (2024, Commitment); eine frühere Kommentierung unter: PIK (2024, Schäden); sowie die modifizierte Untersuchung unter: Kotz et al. (2025, Correction).

⁵⁹⁷ *PIK-Forscherin Leonie Wenz*, zitiert nach: PIK (2024, Schäden). Vgl. dazu auch: BMW (2024, Kosten). [Anm. d. Verf.: Selbst diese Kosten sind jedoch noch ohne explizite Berücksichtigung potentieller Kippdynamiken und deren erwartbar deutlich höheren kumulativen und potenzierenden Effekten].

Abb. 67: Mögliche ökonomische Quantifizierung zukünftiger Klimaschäden



Quelle: Kotz et al. (2024, Commitment); Daten teilweise überholt durch: Kotz et al. (2025, Correction)

Negative Rückwirkungen auf Volkswirtschaften und Finanzsysteme

Auch wenn vermutlich sämtliche heute angestellten (groben) Berechnungen zu Art und Umfang dieser „ökonomischen Klimaschäden“ Makulatur sein dürften (und von der späteren Realität entweder deutlich übertroffen oder aber in Teilen widerlegt werden), sind diese Abschätzungen der zukünftig zu erwartenden und sehr **vielfältigen Klimafolgeschäden** keinesfalls trivial.⁵⁹⁸

- Genau deshalb warnen Klimawissenschaftler schon seit längerem, dass mit Blick auf die globale Erwärmung die **Kosten des Nichthandelns** die Kosten einer konsequenten Anpassung wohl um ein Mehrfaches übersteigen werden.⁵⁹⁹

“

*Es kostet uns viel weniger,
das Klima zu schützen,
als dies nicht zu tun.*

Leonie Wenz, Klimaforscherin, 2024

”

⁵⁹⁸ Vgl. dazu die entsprechende Einordnung der deutschen Politik unter: BMW (2024, Kosten). Vgl. dazu auch eine entsprechende Studie der *Universität Mannheim* mit der *Europäischen Zentralbank (EZB)* unter: Usman et al. (2025, Impact); sowie: *Universität Mannheim* (2025, Wetterereignisse); ergänzend dazu auch: *Tagesschau* (2025, Extremwetter).

⁵⁹⁹ So bereits der renommierte Vordenker *Nicholas Stern* in seinem vielzitierten *Stern-Report*, wonach die Kosten des Nichthandelns um den Faktor 5 bis 20 höher seien; vgl. dazu: Stern (2006, Economics). Ganz ähnlich argumentiert auch Klimaforscherin *Leonie Wenz*: „Es kostet uns viel weniger, das Klima zu schützen, als dies nicht zu tun – und zwar selbst dann, wenn man nur rein wirtschaftliche Auswirkungen berücksichtigt und weitere Folgen wie die Verluste von Menschenleben oder der biologischen Vielfalt außen vor lässt.“; zitiert nach: PIK (2024, Schäden). Auch der *Weltklimarat* verweist in seinen Berichten immer wieder auf „Die Vorteile zeitnahen Handelns“; vgl. etwa: IPCC (2024, Synthesebericht).

Folgerichtig fordern führende Klimaforscher wie *Timothy Lenton* eine explizite **Einbeziehung kritischer Klimakippunkte** – sowie deren mutmaßlicher direkter sowie indirekter Folgewirkungen und „Kosten“ – in die gegenwärtig verwendeten **Wirtschaftsmodelle** sowie polit-ökonomische Analysen und Planungen:

- ▶ „To achieve this, it is urgent to incorporate climate system tipping points in economic analyses.“⁶⁰⁰

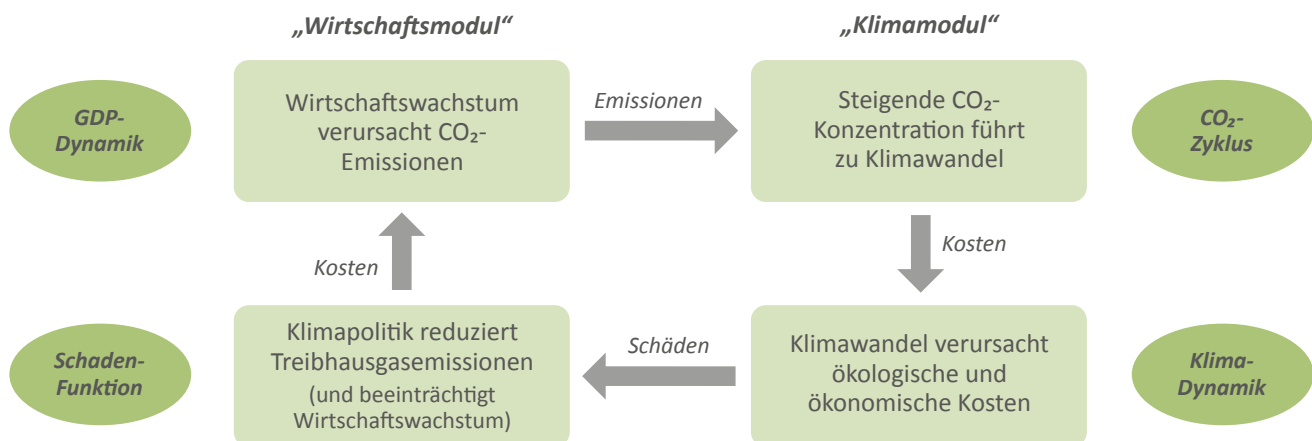
Vor diesem Hintergrund rücken zuletzt die „strikt rationalen“ Überlegungen des Ökonomen *William Nordhaus* wieder vermehrt in den politischen Fokus: *Nordhaus* – der erste und bislang einzige Nobelpreisträger in der Disziplin Umweltökonomie – hat ein quantitatives Wachstumsmodell entwickelt, das die Kosten einer aktiven CO₂-Emissions-

vermeidung den möglichen Schäden infolge des Klimawandels gegenüberstellt.⁶⁰¹

Im Rahmen seines sogenannten „*DICE-Modells*“ (für: *Dynamic Integrated Climate-Economy*) verknüpft *Nordhaus* die beiden Faktoren „**Kosten der Emissionsreduktion**“ und „**Kosten des Klimawandels**“. Diese Modellierung ist in der heutigen Klimadiskussion von grundlegender Bedeutung, da sie – zumindest prinzipiell – eine Gegenüberstellung und Abwägung der beiden Faktoren „**Dekarbonisierungskosten**“ und „**Klimafolgekosten**“ ermöglicht (vgl. dazu Abb. 68).

- ▶ Dieser Ansatz erlaubt theoretisch die Berechnung eines „*Kosten-Optimums*“, das einen „*bestmöglichen Kompromiss*“ zwischen planvollem Ressourceneinsatz und drohenden Klimaschäden ermöglicht.⁶⁰²

Abb. 68: Das „*DICE-Modell*“ zur ökonomischen Bewertung von Klimapolitik und Klimaschäden



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung; in Anlehnung an Nordhaus (2018, Lecture)

⁶⁰⁰ *Timothy Lenton*, Experte für Klimakippunkte, Professor an der *University of Exeter* und Leiter des *Global Systems Institute*, zitiert nach: OECD (2022, *Climate Tipping Points*), S. 44; (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶⁰¹ Vgl. dazu grundlegend: Nordhaus (2018, Lecture); sowie ausführlich: Barrage/Nordhaus (2024, DICE-2023); Nordhaus (2024, DICE).

⁶⁰² Das *DICE-Modell* „... war eines der ersten Integrierten Bewertungsmodelle (*integrated assessment model, IAM*) für die Analyse globaler Klimapolitiken in den frühen neunziger Jahren. (...) Um die Auswirkungen der produktionsbedingten CO₂-Emissionen zu berücksichtigen, beinhaltet das DICE ein einfaches Kohlenstoffmodell, das abbildet wie sich CO₂ in der Atmosphäre anreichert, und ein einfaches Klimamodell, das die erhöhte CO₂-Konzentration in einen Temperaturanstieg übersetzt, der wiederum die gesamtwirtschaftliche Produktion verringert.“; DKK (2018, Nordhaus).

Da eine schnelle, massive und global koordinierte Reduktion von Treibhausgasemissionen sowohl aus (geo-)politischer wie auch aus wirtschaftlicher Sicht wenig wahrscheinlich ist, gewinnen die Überlegungen von Nordhaus aktuell an Relevanz, denn:

- ▶ Wenn schon eine Begrenzung der Erderwärmung auf den „kritischen Grenzwert“ von 1,5°C kaum noch realistisch erscheint, sollten zumindest die absehbaren (und unvermeidlichen) Lasten des Klimawandels möglichst effizient strukturiert und verteilt werden.⁶⁰³



Climate change: The Ultimate Challenge for Economics.

William Nordhaus (2018, Lecture)



Diese veränderten Einschätzungen haben zunehmend auch direkte Rückwirkungen auf die Stabilität – oder Vulnerabilität – ganzer Volkswirtschaften und globaler Finanzsysteme. So greift etwa neuerdings die Europäische Zentralbank (EZB) das Problem rapide fortschreitender Klimaveränderungen in einigen sehr **zentralen Grundsatzüberlegungen** auf. Diese konzedieren, dass sämtliche Schätzungen zu den ökonomischen Kosten des Klimawandels aufgrund aktueller Realitäten immer wieder **deutlich nach oben revidiert** werden mussten – und heute **dreimal so hoch** sind wie noch vor wenigen Jahren:

- ▶ „For example, according to the latest estimates from the Network for Greening the Financial System, the potential loss of global GDP if climate action falters is now **projected to be three times higher than in earlier assessments** from just a few years ago.“⁶⁰⁴

Gleichzeitig wächst nach Einschätzung der EZB der Grad der Abhängigkeit von natürlichen Ressourcen und Ökosystemen auch für individuelle Unternehmen oder Lieferketten signifikant. Damit steigt zwangsläufig auch das **Potential für spezifische oder kollektive Unternehmensrisiken** – sowie für **negative Rückkopplungen** in ganzen Ökonomien und Finanzsystemen:

- ▶ „ECB research has shown that **72% of euro area companies** depend on at least one of nature’s ecosystem services. These services are **declining at a faster rate than at any time in human history**.“⁶⁰⁵

Speziell der letztgenannte Aspekt hat unmittelbare Konsequenzen auch für die Ebene der **Kapitalmärkte und Finanzsysteme**, die im nachfolgenden Kapitel näher analysiert werden.

Zum Konzept und zum besseren Verständnis der ökonomischen Kosten des Klimawandels hat *Nicholas Stern*, ehemaliger Chefökonom der *Weltbank*, maßgeblich beigetragen: In seinem bereits im Jahr 2006 erstellten Bericht „*The Economics of Climate Change*“ hat *Stern* erstmals versucht, die **möglichen Kosten** einer ungebremsten Erderwärmung sowie die daraus resultierenden **ökonomischen Folgeeffekte** zu quantifizieren.⁶⁰⁶ Hier geht’s direkt zu einer deutschen Zusammenfassung des „*Stern Review*“:



⁶⁰³ Obwohl das DICE-Modell des Öfteren kritisiert wurde, stellt es aus heutiger Sicht eines der wenigen Konzepte dar, mit dem eine solche Abwägung grundsätzlich fundiert werden kann. Barrage/Nordhaus (2024, DICE-2023) erklären dazu: „The DICE model is primarily designed for **policy optimization**, although it can also be run as an **evaluation model** for given policies. In both settings, the approach is to maximize an economic objective function (the goal implicit in the problem).“; (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶⁰⁴ Frank Elderson, Direktoriumsmitglied und stellvertretender Vorsitzender im Aufsichtsgremium der EZB; zitiert nach: EZB (2025, Crises); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶⁰⁵ Frank Elderson, Direktoriumsmitglied und stellvertretender Vorsitzender im Aufsichtsgremium der EZB; zitiert nach: EZB (2025, Crises); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶⁰⁶ Vgl. dazu: Stern (2006, Economics); sowie als deutsche Zusammenfassung: SCNAT (2008, Stern-Report).

6.3 Unterschätzte Risiken für Finanzsysteme und Kapitalmärkte

Dass der Klimawandel hohe ökologische und ökonomische Kosten verursachen wird, ist seit langem bekannt. Dennoch haben speziell die weltweiten Kapitalmärkte diese Risiken offenbar bislang stets unterschätzt. Ursache dafür könnte die simple Annahme sein, dass derartige Kosten stets von **großen Kollektiven** – Versicherungen und staatliche Deckungsstöcke – getragen und letztlich „sozialisiert“ würden. Gemäß dieser (äußerst zweifelhaften) Logik wären insbesondere einzelne Unternehmen von den Kosten des Klimawandels nur indirekt betroffen.

► **Diese naive Grundannahme wird derzeit jedoch mit hoher Dynamik widerlegt!**

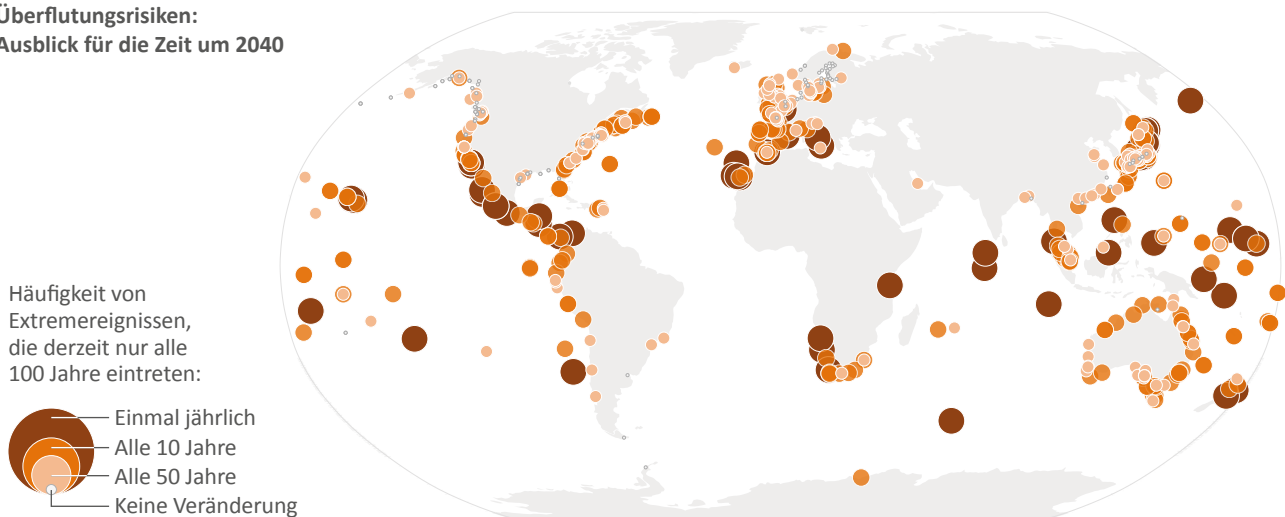
Klimarisiken werden zunehmend „unversicherbar“

Seit kurzem melden sich insbesondere große Versicherungen und Rückversicherungen mit alarmierenden Einschätzungen, die in wichtigen Teilen des globalen Finanzsystems **ernsthafte Schockwellen** ausgelöst haben. Hintergrund ist die Tatsache, dass aus Sicht betroffener Versicherungen viele Individualrisiken im Zeichen massiver Klimaschäden nicht mehr länger versicherbar sind – zumindest nicht zu bislang marktüblichen Konditionen.

► Diese Einschätzung gilt derzeit etwa in den USA für die besonders brandgefährdeten Regionen in **Kalifornien**, speziell rund um Los Angeles – aber auch für bestimmte Gebiete in **Florida**, wo dauerhaft massive und deutlich ansteigende Schäden durch Naturkatastrophen zu erwarten sind (Wirbelstürme, Überflutungen, Meeresspiegelanstieg etc.).

Abb. 69: Deutliche Zunahme weltweiter Überflutungsrisiken

Überflutungsrisiken:
Ausblick für die Zeit um 2040



Quelle: IPCC (2023, Synthesis)



Global risk management is currently failing and blind to systemic risk.

Timothy Lenton, Klimaexperte, 2025



Ein zentraler Risikoaspekt ist dabei die absehbare Zunahme lokaler und regionaler **Überflutungen**, die besonders exponierte Küstenregionen mit deutlich erhöhter Häufigkeit und verstärkter Intensität heimsuchen werden. Dahinter stehen sowohl der (progressiv) **ansteigende Meeresspiegel** als auch dessen **latente Verschärfung** durch stärkere Wirbelstürme und andere Extremwetterereignisse.

- ▶ In Kombination bedeutet dies in den kommenden Jahren eine **stark wachsende Gefahr für ungeschützte Küstenlinien** (vgl. dazu die entsprechende „Risikolandkarte“ in Abb. 69).⁶⁰⁷

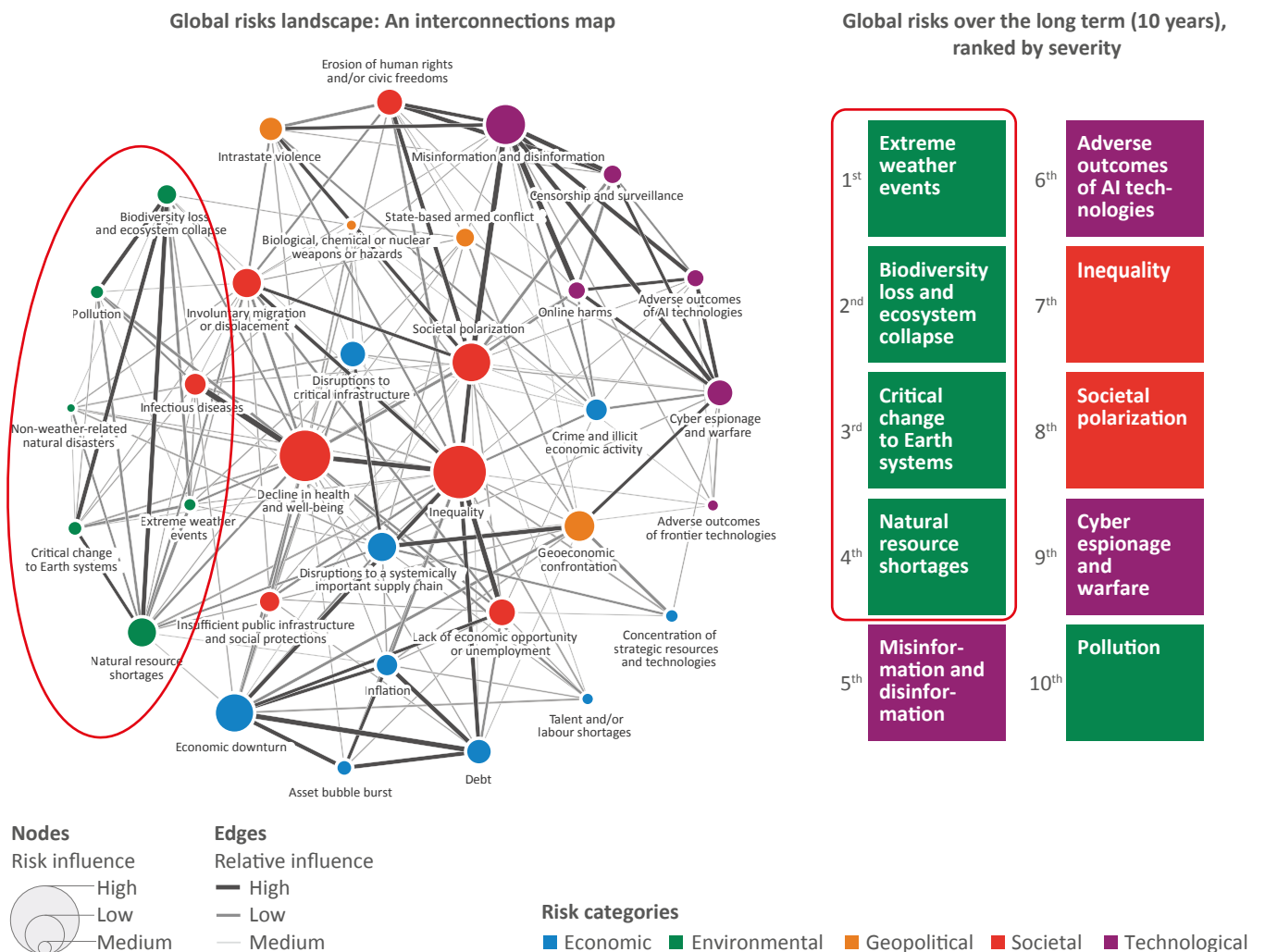


Hurrikane, Gewitter, Überschwemmungen, Waldbrände: Der Klimawandel ändert Wetterrisiken.

Munich RE (2025, Klimawandel)



Abb. 70: Klimarisiken dominieren zunehmend globale Risikoeinschätzungen



Quelle: WEF (2025, Risks)

⁶⁰⁷ Entsprechende Risikozonen betreffen u.a. die USA (West- und Ostküste), Mittelamerika, die Karibik sowie Südostasien – aber auch den Mittelmeerraum. Vgl. dazu insbesondere: IPCC (2023, Report), S. 100.

Große **Rückversicherer**, die in ihrer Funktion weitreichende globale Risiken abdecken, warnen seit längerem vor der **Gefahr einer systemischen Krise**. Insbesondere *Munich RE*, die weltweit größte Rückversicherung, beschäftigt sich seit Jahren intensiv mit den **finanziellen und nichtfinanziellen Risiken**, die aus einem beschleunigten Klimawandel resultieren. Entsprechendes Fachwissen wird dort in eigenständigen Expertengruppen gebündelt und gemeinsam mit Klimaforschern laufend ausgewertet und aktualisiert.⁶⁰⁸

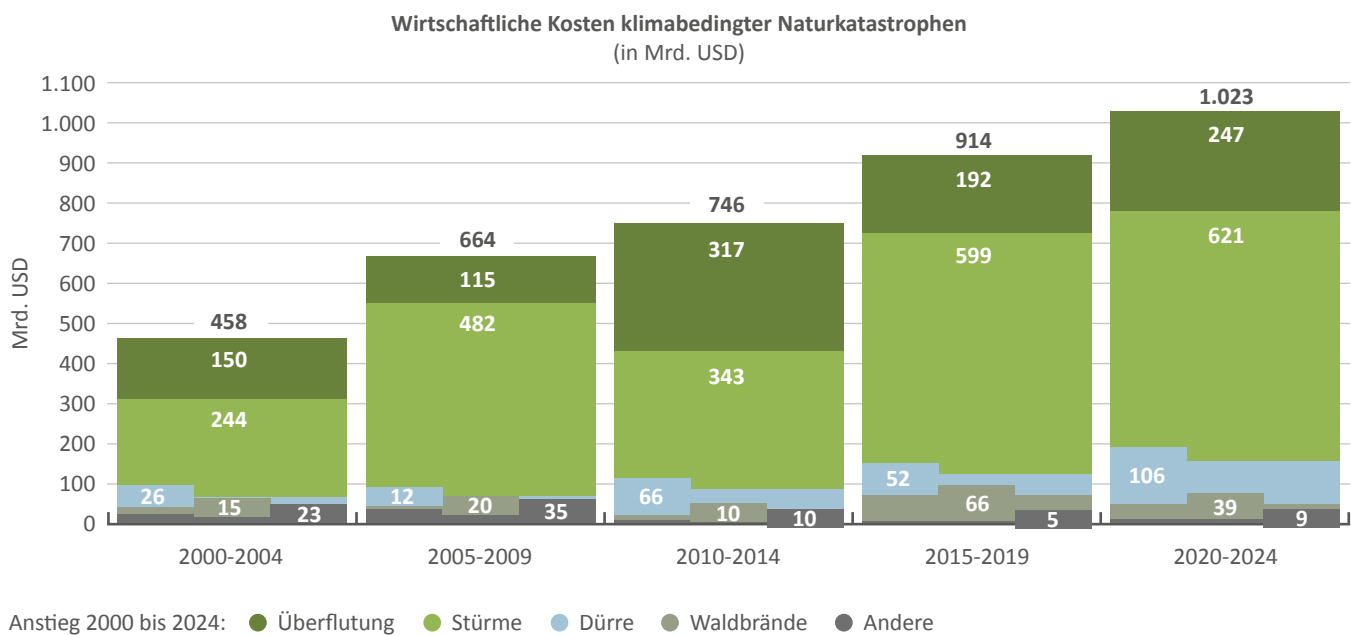
- ▶ Experten aus diesem Bereich sind auch ständige Teilnehmer des sogenannten *Risk Panel* beim *World Economic Forum (WEF)*, das seit Jahren vor den zunehmenden Risiken des Klimawandels warnt – dabei aber auch die **Vielzahl systemischer Interdependenzen und Rückkopplungseffekte** im Blick hat (vgl. dazu Abb. 70, S. 145).⁶⁰⁹

Wichtige Finanzmarktteilnehmer wie *Munich RE* verweisen inzwischen explizit auf die zunehmende Schadenshöhe, die weltweit jedes Jahr als Folge von – überwiegend vom Klimawandel bedingten – **Naturkatastrophen** entsteht und die zu wesentlichen Teilen vom weltweiten Versicherungs- und Rückversicherungsmarkt übernommen werden muss:

- ▶ Demnach belaufen sich die seit 1980 kumulierten Schäden „... **auf 6,9 Billionen US\$** – das entspricht etwa dem gesamten Bruttoinlandsprodukt des Jahres 2023 von Großbritannien und Indien zusammen. Rund ein Drittel dieser Schäden war versichert.“⁶¹⁰

Diese Tendenz spiegelt sich sowohl in den **weltweiten Schadensstatistiken** als auch in exponierten Regionen und Märkten wie den USA, wo zuletzt ein markanter Anstieg von Schadensereignissen mit **mehr als 1 Mrd. USD** zu verzeichnen ist (vgl. dazu Abb. 71 und 72):

Abb. 71: Weltweit steigende Kosten von Naturkatastrophen und Extremwetterereignissen



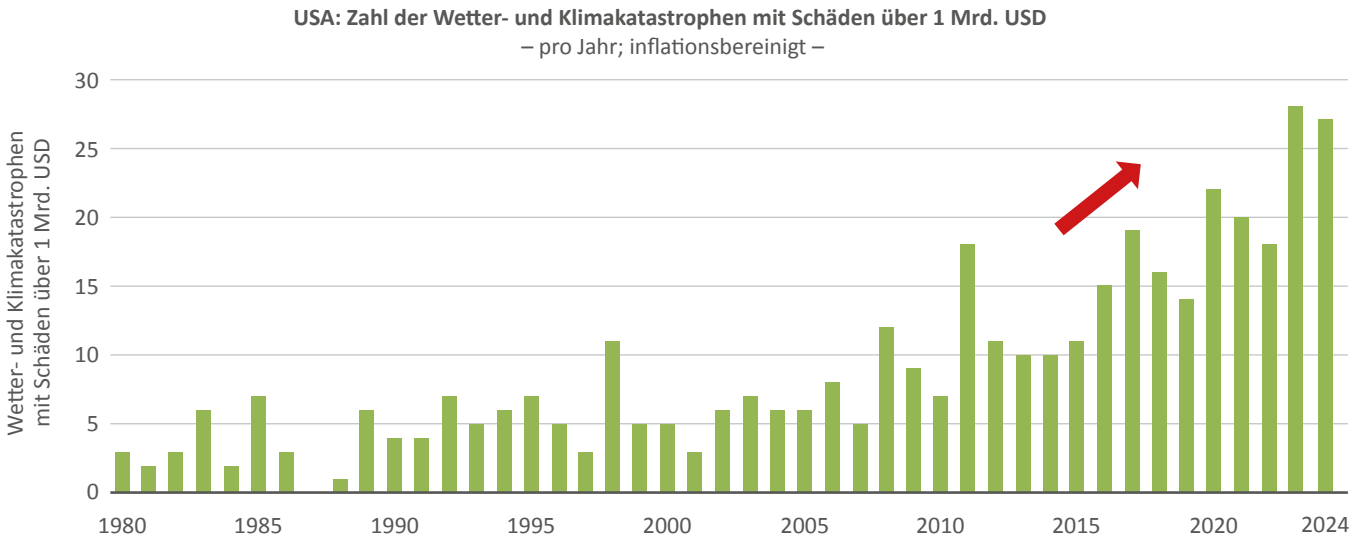
Quelle: WEF (2024, Inaction)

⁶⁰⁸ Vgl. dazu: Munich RE (2025, Klimawandel).

⁶⁰⁹ Vgl. dazu: WEF (2025, Risks); nicht wirklich überraschend sind die ersten 4 („Top 4“) der 10 Top Risiken (> 10 Jahres-Horizont) dem Bereich *Klimawandel/Erdsystem* (mit *Climate Tipping Point*-Dynamiken) zugeordnet!

⁶¹⁰ Vgl. dazu: Munich RE (2025, Naturkatastrophen); (Hervorhebungen durch Verfasser).

Abb. 72: Steigende Schäden durch Naturkatastrophen und Extremwetterereignisse (USA)



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025; Daten: GZERO/NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI)



We are entering a new era where insurance signals shape economic outcomes.

Rowan Douglas, CEO, Howden, 2025



„Insurability Imperative“ und „Protection Gap“ als zentrale Treiber

Die klare **Zunahme klimabedingter Großschäden** dürfte wohl erst der Anfang eines klaren Trends sein, der in den kommenden Jahren zu weiter **steigenden Zerstörungen** von Gebäuden, Lebensräumen und wichtiger Infrastruktur führen wird. Daraus entsteht – spätestens jetzt – ein Problem von großer Tragweite, das letztlich die **Stabilität ganzer Finanzsysteme gefährdet**.

- ▶ Hintergrund ist die (rein versicherungsmathematisch bedingte) Tatsache, dass typische Schadensereignisse bei deutlich **zunehmender Wahrscheinlichkeit** und ebenso **zunehmender erwarteter Schadenssumme** von einer rational kalkulierenden Versicherung schlicht nicht mehr abgedeckt werden können und somit „nicht versicherbar“ sind.

Wird eine solche Entwicklung – die im Einzelfall strikt rational ist – jedoch auf einen größeren Maßstab übertragen, so entsteht daraus sehr schnell ein **systemisches Problem**: Wohnhäuser, Fabrikgebäude oder Hafenanlagen, die für klima-bedingte Schäden keinen Versicherungsschutz mehr erhalten, gleichzeitig aber mit hohen Hypotheken belastet sind, werden aus Sicht der Kreditgeber zu einem **untragbaren Risiko**. Eine solche Einschätzung würde Banken dazu zwingen, entsprechende **Wertberichtigungen** auf ihre Kreditforderungen vorzunehmen sowie **Rückstellungen** für drohende Kreditausfälle zu bilden. Sollten derartige Anforderungen gehäuft auftreten und sich relativ schnell und konzentriert vollziehen, was bei sprunghaften klimatischen Veränderungen sehr wahrscheinlich wäre, hätte das entsprechende Banken- und Kreditsystem ein **akutes Bilanzproblem**.

- ▶ Spätestens hier wird klar, dass dies bei Erwartung ansteigender klimabedingter Schadensfälle **hochdynamische Prozesse** in Gang setzt – mit dem Potential, zentrale Strukturen der Kredit- und Kapitalmärkte zu untergraben und **massiv zu gefährden!**

Dieser kritische Mechanismus ist keinesfalls nur Theorie (vgl. Abb. 73):

Günther Thallinger, für Investment und Nachhaltigkeit verantwortliches Vorstandsmitglied der Allianz SE, hat erst vor kurzem in einem pointierten Beitrag auf das Problem hingewiesen, dass eine Vielzahl potentieller Risiken mit fortschreitendem Klimawandel **faktisch nicht mehr versicherbar** ist.

Thallinger zieht daraus die **zentrale Schlussfolgerung**: „This is a systemic risk that threatens the very foundation of the financial sector.“⁶¹¹

Hier geht es direkt zu dem auf LinkedIn veröffentlichten Beitrag von Günther Thallinger:



Auch der größte britische Versicherungsmakler *Howden* adressiert dieses Thema bereits sehr direkt und spricht mit Blick auf drohende Klima- und Transitionsrisiken vom „**Insurability Imperative**“:

- ▶ „As physical climate shocks escalate and underwriting criteria tighten, (...) insurability is no longer just a transactional issue, but a **strategic priority**.“⁶¹²

Die entscheidenden Überlegungen dahinter sind sehr klar und betreffen ein latentes, aber stetig anwachsendes und zunehmend **systemisches Absicherungsdefizit** („**Protection Gap**“):

- ▶ „Floods in Europe, fires in California, crop failures across Asia are no longer rare occurrences. Indeed, they are increasingly happening in places where insurance was once taken for granted. The result? **A widening protection gap**. Assets, communities, and business models becoming un-insurable. (...) **After all, you can't invest in what you can't insure**.“⁶¹³

Abb. 73: Weckruf aus der Versicherungsindustrie



Climate, Risk, Insurance: The Future of Capitalism



Quelle: Thallinger (2025, Capitalism)

Versicherungsexperte *Thallinger* erklärt die möglichen Konsequenzen für die Finanzmärkte unter der Annahme eines Anstiegs der Erderwärmung in Richtung 3°C:

- ▶ „At that point, risk cannot be transferred (**no insurance**), risk cannot be absorbed (**no public capacity**), and risk cannot be adapted to (**physical limits exceeded**).
- ▶ That means **no more mortgages**, no new real estate development, no long-term investment, **no financial stability**. The financial sector as we know it ceases to function. And with it, capitalism as we know it ceases to be viable.“⁶¹⁴



Entire regions are becoming uninsurable. This is a systemic risk that threatens the very foundation of the financial sector.

Günther Thallinger (2025, Capitalism)



⁶¹¹ Vgl. dazu: Thallinger (2025, Capitalism).

⁶¹² Howden (2025, Insurability); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶¹³ Howden (2025, Insurability), S. 6; (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶¹⁴ Thallinger (2025, Capitalism); (Hervorhebungen durch Verfasser).

Steigende Risiken auch für Finanzsysteme und Kapitalmärkte („High Impact – High Probability“)

Durch die neuen Erkenntnisse der *Climate Tipping Points*-Forschung gewinnt die risikobasierte Betrachtung vieler Versicherungen und Rückversicherungen massiv an Evidenz. Dabei geht es nicht nur um die bereits realisierten Klimaschäden der letzten Jahre, die oftmals bisherige Erwartungen klar übertroffen haben.

- ▶ Entscheidend ist vielmehr die Notwendigkeit einer **signifikanten Hochstufung künftiger Risikowahrscheinlichkeiten**, die sich zwingend aus den Klimastudien der jüngeren Zeit ergibt.

Damit wird unmittelbar klar:

Das **Phänomen kritischer Klimakippunkte** – sowie insbesondere deren stark **erhöhte Kritikalität** – verändert die lange Zeit vorherrschende Sicht auf die Risiken des Klimawandels radikal! Denn:

Adverse oder sogar katastrophale Klimaereignisse, die bislang zwar als „potenziell bedrohlich“ galten, aber nur mit marginalen Risikowahrscheinlichkeiten belegt wurden, mutieren immer schneller zu **Ereignissen mit enormer Wirkung und zugleich progressiv zunehmender Eintrittswahrscheinlichkeit!**

Vor diesem Problem warnt sehr klar auch *Global Tipping Points Report* (2023):

- ▶ „Some Earth system tipping points are no longer high-impact, low-likelihood events, they are **rapidly becoming high-impact, high-likelihood events.**“⁶¹⁵

Durch die neuesten Erkenntnisse der Klimaforschung – insbesondere aber durch das Konzept der *Climate Tipping Points* – verschärft sich also das **gesamte materielle und immaterielle Risikoprofil** des globalen Klimawandels **in fundamentaler Art und Weise** – ein Aspekt, der aber bislang in vielen Diskursen noch deutlich unterschätzt oder nicht hinreichend zur Kenntnis genommen wird!⁶¹⁶

Dieser Punkt ist von entscheidender Bedeutung, denn:

- ▶ Wenn die Annahme relativ **schneller, abrupter, hochdynamischer, nichtlinearer** und oftmals **sprunghafter Veränderungen** der globalen Klimaverhältnisse richtig ist, und wenn auch die entsprechenden **Eintrittswahrscheinlichkeiten deutlich zunehmen**, müssen viele der bisherigen (eher „linear“ aufgebauten) Risikomodelle und Risikoberechnungen massiv adjustiert und insbesondere um **spezifische Tipping Point-Risiken** ergänzt werden!
- ▶ Vereinfacht ausgedrückt: Wenn potentiell großvolumige Risikoereignisse nicht länger als „extreme Ausnahme“ betrachtet werden können, sondern stattdessen – selbst aus Sicht nüchterner Versicherungsmathematik – bereits **signifikante Eintritts- und Realisationswahrscheinlichkeiten** erreichen, geraten Finanzsysteme massiv unter Druck!



... *it is urgent to incorporate climate system tipping points in economic analyses.*

Timothy Lenton, Klimaexperte, 2022



Neue Risikobewertungen und das Konzept der „Planetary Solvency“

Die oben skizzierten Überlegungen führen direkt zum Konzept der **Planetary Solvency**, durch das eine bessere „Übersetzung“ und Integration möglicher Folgen **klimabedingter Extremereignisse** – sowie insbesondere der rapide zunehmenden **Climate Tipping Point-Dynamiken** – in die Welt der „klassischen“ Risikomodelle bei Banken und Versicherungsunternehmen angestrebt wird.⁶¹⁷

⁶¹⁵ University of Oxford, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 20; (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶¹⁶ Fairerweise ist hier anzufügen, dass die Expertendiskussion zu *Climate Tipping Points* noch relativ jung ist und schon deshalb in vielen Fachpublikationen – so auch im letzten Sachstandsbericht des *Weltklimarats* IPCC (2023, Report) – entweder (noch) keine oder oftmals nur eine untergeordnete Rolle spielt.

⁶¹⁷ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 6.2; weiterführend auch: IFoA (2024, *Scorpion*), IFoA (2025, *Solvency*); sowie: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2025, Report).

Um die Relevanz einer „problemadäquaten“ Risikobewertung und deren konsequenter Anwendung auch bei den Kernfragen des Klimawandels zu verdeutlichen, stellen die Versicherungsmathematiker der britischen Aktuarsvereinigung *IFoA* (2024) eine **simple Vergleichsrechnung** an:

Demnach entsprechen die Risiken, die im letzten Sachstandsbericht des *Weltklimarats IPCC* (2023) mit Blick auf „stärkere“ Erderwärmungsrisiken („**größer als 4,5°C**“) implizit unterstellt sind, einer **rechnerischen Eintrittswahrscheinlichkeit von immerhin 18%**⁶¹⁸

Mit anderen Worten – wiederum angelehnt an *IFoA* (2024):

- ▶ Die Wahrscheinlichkeit einer Erderwärmung von mehr als **4,5°C** – was den Übergang in ein sogenanntes „**Hothouse Scenario**“ implizieren würde – liegt sogar „über der Sterbewahrscheinlichkeit bei *Russisch Roulette*“!⁶¹⁹

Daraus folgt zwingend: Die bisherigen Ansätze und Zielvorgaben von Politik und Aufsichtsbehörden beim Klimawandel sind weder ausreichend noch ist die wichtigste Stoßrichtung – *Einhaltung eines 1,5-2°C-Ziels* – sinnvoll definiert, denn: „... *it is mismatched to the risks and potential damages posed by climate change.*“⁶²⁰

Erforderlich ist somit ein kollektiver **Prozess systemischer Risikoadjustierung**, der die komplexen, nichtlinearen und oftmals sprunghaft ansteigenden Risikoverteilungen realer Klimawandelprozesse auch für Wirtschafts- und Kapitalmarktexperten besser verständlich macht und „operationalisiert“.

- ▶ Von grundlegender und für die Zukunft absolut entscheidender Bedeutung ist dabei ein besseres Verständnis für die **nichtlineare Dynamik** der *Climate Tipping Points*.⁶²¹

Zumindest in Teilbereichen des globalen Finanzsystems scheint dieser Prozess bereits anzulaufen: Auslöser und Treiber sind dabei bislang meist **Zentralbanken und andere Aufsichts- oder Regulierungsbehörden**. Diese Institutionen erkennen inzwischen ein **rapide zunehmendes Risiko** für die Stabilität ihrer jeweiligen Finanzsysteme, ausgelöst durch bislang oft noch unterschätzte oder fahrlässig „ausgeblendete“ Klimarisiken!

Diese späte Einsicht folgt letztlich der zwingenden Logik von *McCarthy/Odier* (2025):

- ▶ „**Klimarisiken sind Finanzrisiken.**“⁶²²

Die möglichen Auswirkungen einer derart **angepassten Risiko-logik** – angelehnt an typische Risikokalküle von Banken oder Versicherungsunternehmen – könnten erheblich sein. Sie hätten ein hohes Potential, die aktuell oft noch fehlgeleiteten, zu zögerlichen oder völlig unzureichenden Maßnahmen gegen den Klimawandel massiv zu beschleunigen und zu transformieren:

- ▶ „*Planetary Solvency risk assessment would likely lead to radically different climate policies.*“⁶²³

Mit Blick auf die **globalen Kapitalmärkte** ist diese Konstellation allerdings nicht ungefährlich, denn:

- ▶ Ähnlich wie vor einigen Jahren beim Problem der „*Carbon Bubble*“, als die Risiken impliziter

⁶¹⁸ Vgl. dazu: *IFoA* (2024, *Scorpion*), S. 17.

⁶¹⁹ Vgl. dazu: *IFoA* (2024, *Scorpion*), S. 17; unter Verweis auf die Analyse von Kemp et al. (2022, *Endgame*). Zu Begriff und Hintergrund von „*Hothouse Scenarios*“ vgl.: unten, nachfolgendes Kap. 6.4.

⁶²⁰ Kemp et al. (2022, *Endgame*).

⁶²¹ Vgl. dazu wegweisend: *IFoA* (2024, *Scorpion*), *IFoA* (2025, *Solvency*); sowie: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2025, *Report*).

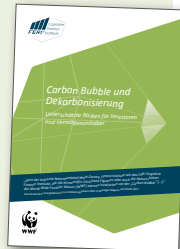
⁶²² *McCarthy/Odier* (2025, *Finanzrisiken*); (Hervorhebung im Original).

⁶²³ *IFoA* (2024, *Scorpion*), S. 27. Ausführlich dazu auch: *IFoA* (2025, *Solvency*).

CO₂-Budgets an den Kapitalmärkten deutlich unterschätzt und allenfalls **rudimentär eingepreist** wurden, scheinen die Kapitalmärkte auch bei den **physischen Klimarisiken** das drohende (und deutlich näher rückende) Problem derzeit noch nicht zu erkennen.⁶²⁴

- ▶ Folglich sind auch hier im Zeitablauf noch **signifikante Neubewertungen** zu erwarten: Diese betreffen wohl zunächst primär **Immobilienmärkte** in besonders exponierten Regionen, werden aber dann (mit einer gewissen Verzögerung) sehr dynamisch auch auf das **Kreditsystem** und betroffene **Bankensegmente** „durchschlagen“.⁶²⁵

Zum Problem der „Carbon Bubble“ hat das FERI Cognitive Finance Institute bereits 2017, gemeinsam mit dem Kooperationspartner WWF, eine wegweisende Studie veröffentlicht. Hier geht’s direkt zur Kurzversion der Studie „Carbon Bubble und Dekarbonisierung – Unterschätzte Risiken für Investoren und Vermögensinhaber“:



„Physische Klimarisiken“ beunruhigen Aufsichtsbehörden und Kapitalmarkt-Regulierer

Der Grad an Aufmerksamkeit, den viele Aufsichtsbehörden für Banken und Finanzmärkte inzwischen dem (keinesfalls neuen) Thema der „Klimarisiken“ widmen, ist bezeichnend. Offensichtlich haben an vielen entscheidenden Schaltstellen der Finanzsysteme lange Zeit „progressivere“ Themen wie

„ESG-Konformität“ und „Diversität“ den Blick für andere, wesentlich ausgeprägtere und – im wahrsten Sinne – „**materielle**“ Risiken verstellt. Doch dieses Bild ändert sich rapide:

So hat erst vor kurzem das deutsche *Bundesamt für Finanzmarktaufsicht (BaFin)* die von ihm beaufsichtigten **Finanzinstitute** angewiesen, zukünftig die „**materiellen Risiken**“ des Klimawandels verstärkt in den Blick zu nehmen. *BaFin*-Präsident *Branson* (2025) warnt explizit:

- ▶ „**Physische Risiken des Klimawandels nehmen zu.**“⁶²⁶



As global temperatures continue to rise, so will the rate and severity of extreme weather events.

WEF (2024, Inaction)



Mit dieser Aussage adressiert *Branson* (2025) die konkrete Erwartung, dass in vielen Sektoren von Wirtschaft und Finanzsystem „**physische Klimarisiken**“ immer stärker durchschlagen werden:

- ▶ „Der fortschreitende Klimawandel und die langfristige Schädigung wichtiger Ökosysteme bergen **erhebliche physische Risiken** für die Unternehmen der Finanzbranche. Vieles spricht dafür, dass wir in den kommenden Jahren deutlich stärker spüren werden, wie sich die Natur und das Klima verändern. **Konkret heißt das unter anderem: mehr Sturzfluten, Hochwasser und Dürren.**“⁶²⁷

⁶²⁴ Genau zu diesem Problemkomplex hat das *FERI Cognitive Finance Institute* bereits 2017 eine grundlegende Studie verfasst; vgl. dazu: Kopp et al. (2017, Bubble).

⁶²⁵ Diese Sorge veranlasst derzeit bereits einige Aufsichts- und Regulierungsbehörden zu verschärften Risikovorgaben speziell im Banken- und Kreditsystem; vgl. dazu ausführlich: unten, nachfolgender Abschnitt.

⁶²⁶ *BaFin*-Präsident *Mark Branson*; zitiert nach: *BaFin* (2025, Verbesserungspotenzial).

⁶²⁷ *BaFin*-Präsident *Mark Branson*; zitiert nach: *BaFin* (2025, Verbesserungspotenzial); (Hervorhebungen durch Verfasser). Diese Einschätzung wird durch zukunftsorientierte Klimamodelle für Mitteleuropa eindeutig gestützt; vgl. dazu etwa: *ntv* (2025, Superzellen): „Mit der Erderwärmung wird (...) die Zahl der besonders schweren Gewitter [Superzellen-Gewitter] drastisch zunehmen.“

Aus der Entwicklung und den aktuellen Trends des globalen Klimageschehens resultiert zwingend eine **verstärkte Risikokumulation in Kernbereichen des Finanzsystems**. Dazu erklärt Branson (2025):

- ▶ „Wenn sich physische Risiken des Klimawandels materialisieren, kann sich das unmittelbar im Finanzsektor niederschlagen, etwa in den **Kreditportfolien der Banken** oder in den **Schadenssummen der Versicherer**.“⁶²⁸

Analog äußert sich auch die *Europäische Zentralbank (EZB)*, die nicht nur das europäische Bankensystem beaufsichtigt, sondern darüber hinaus auch für die Stabilität des gesamten Euro-Währungsraums und des zugehörigen Finanzsystems verantwortlich ist:

- ▶ „**Global warming increases the likelihood of extreme weather events. The resulting damage can have a significant impact on the financial system.**“⁶²⁹

Aus diesen Positionen wird klar, dass sich an wichtigen Schaltstellen moderner Finanzsysteme sehr schnell, mit großer Dynamik und hoher Intensität **hohe Finanzrisiken** ansammeln könnten – ausgelöst durch den **nichtlinearen Anstieg globaler sowie verstärkt auch lokaler Klimarisiken!**

Gleichzeitig rücken damit erstmals **unmittelbare Klimarisiken auch auf der Mikroebene** in den Fokus. Das betrifft etwa die Frage, ob ein Unternehmen in einer potentiellen Hochwasserregion angesiedelt ist, in großem Umfang Wasser benötigt oder von einer laufenden Versorgung per Schiff abhängig ist. Zwangsläufig muss eine solche Risikoüberprüfung auch essenzielle Zulieferer, Versorger oder Distributoren inkludieren. In diesem Sinne fordert EZB (2025):

- ▶ „Die Unternehmen müssen einschätzen können, welche wirtschaftlichen Schäden beispielsweise Extremwetterereignisse in ihrem Geschäft anrichten können.“⁶³⁰

⁶²⁸ BaFin-Präsident Mark Branson; zitiert nach: BaFin (2025, Verbesserungspotenzial); (Hervorhebungen durch Verfasser). Dieses Argument folgt im Kern der Logik des „*Insurability Imperative*“ und „*Protection Gap*“; vgl. dazu ausführlich bereits: oben, vorhergehender Abschnitt.

⁶²⁹ EZB (2024, Indicators); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶³⁰ EZB (2025, Crises). Analog auch: EZB (2024, Indicators).

⁶³¹ Vgl. dazu ausführlich: EZB (2024, Indicators).

⁶³² Vgl. dazu ausführlich: EU-Kommission (2024, Finanzstabilität); (Hervorhebungen im Original).

⁶³³ Vgl. dazu ausführlich: FSB (2025, Vulnerabilities).

⁶³⁴ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 6.1 und 6.2.

Zu diesem Zweck hat die **EZB** 2025 ein konkretes Gerüst entwickelt („*analytical indicators on physical risks*“), auf dessen Grundlage die beaufsichtigten Finanzinstitute spezifische **Risikoeinschätzungen** („*risk scores*“) und individuelle **Risikoexponierungen** („*potential exposure at risk*“) ableiten sollen.⁶³¹

In ähnlicher Weise hat bereits 2024 die **EU-Kommission** ein ausführliches Konzept zur besseren „**Überwachung klimabezogener Risiken für die Finanzstabilität**“ verabschiedet.⁶³²

Auch branchenübergreifende Institutionen – darunter etwa das **Financial Stability Board (FSB)** – haben in jüngerer Zeit konkrete Vorgaben und Handlungsempfehlungen zum Umgang mit den „*physischen Risiken des Klimawandels*“ im Finanzsystem erarbeitet.⁶³³

- ▶ Letztlich folgen alle diese Ansätze dem bereits dargestellten Konzept der „**Planetary Solvency**“.⁶³⁴

Hier geht’s direkt zur Risikoanalytik der EZB zu (klimawandelbedingten) „*physischen Risiken*“:



Klimarisiken sind Finanzrisiken.

McCarthy/Odier (2025, Finanzrisiken)



Gesamthaft resultiert daraus ein **völlig neues Konzept zur Erfassung möglicher Klimarisiken**, das starke Rückwirkungen auf zentrale Elemente von Volkswirtschaften und Finanzsystemen hat. Supranationale Institutionen wie *Weltbank* oder *UN* geben diesen Ansätzen bereits zunehmend Gewicht, ebenso wie Zentralbanken (*EZB*) oder nationale Aufsichtsbehörden (*BaFin*).⁶³⁵

Dies alles befindet sich aber derzeit erst in einem sehr frühen Stadium.

- Erforderlich sind vor allem noch mehr **Daten**, eine systematischere **Risikoerfassung** sowie eine intelligente Verknüpfung mit quantitativen Modellen zur „Umrechnung“ dynamischer **Klimarisiken** in potentielle **Finanzrisiken**.⁶³⁶

Diese Schritte sind essentiell, erfordern aber noch deutlich weitergehende Anstrengungen – insbesondere hinsichtlich einer expliziten Integration **nicht-linearer Risikorealisationen** und potentieller „**High Impact-Risikokaskaden**“, die infolge von *Climate Tipping Points*-Dynamiken immer wahrscheinlicher – und zunehmend virulenter – werden.⁶³⁷

Mögliche Wege dorthin zeigen Initiativen und Ansätze wie das *University of Oxford’s Resilient Planet Finance Lab*, das *Global Tipping Points Planetary Solvency Dashboard* von *University of Exeter* und *IFoA*, oder das multinational angelegte *Encore*-Netzwerk.⁶³⁸

Hier geht’s direkt zu den entsprechenden Webseiten:



Dass die genannten Punkte zukünftig – wesentlich stärker als bislang noch üblich – auch in die **strategische Entscheidungslogik** von sogenannten „*Asset Owners*“ und anderen institutionellen Investoren integriert werden müssen, ist unumstritten. Zentrale Anforderungen und mögliche Wege dorthin verdeutlicht nachfolgend *Antje Biber*, Nachhaltigkeitsexpertin und Aufsichtsratsmitglied der *European Energy Exchange AG*:

Paradigmenwechsel im Finanzsystem: Klimarisiken als Preisfaktor

Aktuell gewinnen die Auswirkungen des Klimawandels zunehmend an Bedeutung für die Real- und die Finanzwirtschaft. Sowohl die *Europäische Zentralbank (EZB)* als auch die *Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht (BaFin)* nehmen das Thema der „*Physischen Risiken*“ nun in den Fokus.

Die *EZB* hat im Juli 2025 einen weitreichenden Beschluss gefasst, der ab Mitte 2026 in Kraft tritt:

- **Klimarisiken werden künftig zu einem eigenständigen Preisfaktor in den Refinanzierungsgeschäften der Notenbank.**⁶³⁹

Konkret bedeutet dies, dass Unternehmensanleihen, die Banken als Sicherheiten bei der *EZB* hinterlegen, anhand ihrer Klimarisiken bewertet werden. Je höher das Risiko – sei es durch Übergangrisiken energieintensiver Branchen oder durch mangelnde Anpassungsstrategien einzelner Unternehmen – desto geringer ist ihr Beleihungswert. Umgekehrt erhalten Anleihen mit einem robusten Klimaprofil einen höheren Wert. Bewertet wird in drei Schritten: branchenspezifisches Transitionsrisiko, unternehmensspezifischer *Klima-Score* sowie asset-bezogene Merkmale wie Restlaufzeit.

⁶³⁵ Vgl. dazu etwa: *Weltbank* (2022, Assessment); *UNEP* (2024, Assessment); *EZB* (2025, Indicators); *BaFin* (2025, Verbesserungspotenzial).

⁶³⁶ Vgl. in diesem Sinne ebenfalls sehr dezidiert: *McCarthy/Odier* (2025, Finanzrisiken).

⁶³⁷ Vgl. zu den genannten Grundeigenschaften bereits sehr ausführlich: oben, Kap. 4.

⁶³⁸ Vgl. dazu überblickartig: *McCarthy/Odier* (2025, Finanzrisiken); sowie weiterführend: *Encore* (2025, Risks); *University of Exeter, Global Tipping Points* (2025, Dashboard); *University of Oxford* (2025, Lab).

⁶³⁹ *EZB* (2025, Transitionsrisiken).

Parallel dazu intensiviert auch die *BaFin* ihre Aufsicht über Banken und Versicherungen hinsichtlich der Integration physischer Klimarisiken in die Risikomanagementsysteme.⁶⁴⁰

Die Finanzinstitute werden angehalten, ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber klimabedingten Schocks zu erhöhen, was durch höhere Kapital- und Liquiditätspolster unterstützt werden soll.

Auswirkungen auf Unternehmensfinanzierung

Für Unternehmen bedeutet diese Entwicklung eine strukturelle Veränderung ihrer Finanzierungskosten. Firmen mit hohen Emissionen oder unsicheren Transformationsstrategien werden es künftig schwerer haben, ihre Anleihen als attraktive Sicherheiten einzusetzen. Dies könnte die Refinanzierung über Banken verteuern und Investoren veranlassen, stärker auf die Umsetzung von Nachhaltigkeitsstrategien zu achten. Unternehmen mit klaren Dekarbonisierungspfaden und belastbaren Klimarisiken werden auch aus Risikoaspekten künftig bevorzugt.

- ▶ Damit verschärft sich gleichzeitig der Druck auf emissionsintensive Branchen, ihre Geschäftsmodelle schneller umzustellen, um den Zugang zu günstigeren Finanzierungen nicht zu verlieren.

Auswirkungen auf die Finanzwirtschaft und Investoren

Für den Finanzsektor insgesamt markiert die Maßnahme einen **signifikanten Paradigmenwechsel**:

Banken müssen ihre Portfolios detaillierter nach Klimarisiken durchforsten, um geeignete Sicherheiten für die Refinanzierung bei der EZB vorzuhalten. Dies fördert eine strukturierte Integration von Nachhaltig-

keitskriterien in das Risikomanagement der Institute. Zugleich wird die Finanzwirtschaft stärker in die Verantwortung genommen, Transformationsprozesse der Realwirtschaft aktiv mitzugestalten. Kapitalflüsse könnten langfristig gezielt in nachhaltigere Technologien und Geschäftsmodelle umgeleitet werden.

Für institutionelle Investoren ermöglichen diese erweiterte Risikobetrachtung und die damit verbundene Transparenz der Transformationsstrategien eine neue Opportunität, die eigenen Klimaziele gezielter umzusetzen.

Schlussfolgerung

Die Einbindung von Klima- und Naturrisiken in die Geldpolitik und Bankenaufsicht ist kein Neben aspekt, sondern **notwendige Voraussetzung für die Zukunftsfähigkeit der Finanzwirtschaft**.

Für Unternehmen eröffnet sich eine neue Form der Marktlogik:

- ▶ **Nachhaltigkeit ist nicht länger ein Reputationsfaktor, sondern eine handfeste Bedingung für das Erreichen günstiger Kredit- und Refinanzierungsbedingungen.**

Investoren wiederum müssen Klimarisiken nicht nur aus einer ethisch-nachhaltigen Perspektive bewerten, sondern erkennen zunehmend den direkten finanziellen Einfluss auf Rendite und Risiko. Langfristig gilt: Nur wer Klimarisiken systematisch einbezieht, kann stabile Finanzierungsstrukturen sichern – und damit auch die Attraktivität für Investoren bewahren, die immer stärker nach zukunftsfähigen, klimaresilienten Geschäftsmodellen suchen.

⁶⁴⁰ BaFin (2025, Risikomanagement).

6.4 Massive politische und gesellschaftliche Herausforderungen

Angesichts des rapide voranschreitenden Klimawandels steht die Menschheit vor einer **Vielzahl sehr ernsthafter Herausforderungen**. Für Politik und Gesellschaft stellen sich dabei einige grundsätzliche Fragen, die – auch abseits der rein klimabedingten Risiken – sehr ernster Natur sind:

- Sollte der Schwerpunkt aktiver Klimapolitik auf einer möglichst rigorosen **Vermeidung von CO₂-Emissionen** liegen, selbst um den Preis sehr hoher gesellschaftlicher Kosten?
- Ist eine klimafreundliche **Transformation der Energie- und Wirtschaftspolitik** („Green Transition“) überhaupt durchführbar, oder fehlen dazu noch wichtige Grundelemente?
- Sind die selbstgesteckten Ziele zur Erreichung von **Klimaneutralität** (ausgeglichene CO₂-Bilanz) ganzer Volkswirtschaften erreichbar, und falls ja, kommen die Ergebnisse rechtzeitig?
- Müssen angesichts der fortschreitenden Erderwärmung sehr viel konsequentere Schritte zur Anpassung an drohende **Extremwetterereignisse** getroffen werden – aber auch (und vor allem) an einen Anstieg des Meeresspiegels?
- Können entstehende **Lasten des Klimawandels** sinnvoll verteilt werden – also sowohl sachgerecht als auch verursachungsgerecht?
- Wie lassen sich **Verteilungskonflikte** zwischen „reichen“ Industrieländern und „armen“ Entwicklungsländern lösen, speziell angesichts offensichtlicher Diskrepanzen bei den Klimafolgekosten und deren individueller Tragfähigkeit?

Und nicht zuletzt: Welche Rolle spielt bei alldem **„Trumps globaler Krieg gegen die Dekarbonisierung“** – also der offenkundige Versuch der derzeitigen US-Regierung, nicht nur den Klimaschutz im eigenen Land zu beenden, sondern auch die weltweiten Bemühungen im Kampf gegen den Klimawandel gezielt zu torpedieren?⁶⁴¹

⁶⁴¹ Diese Frage wird im Rahmen der vorliegenden Analyse nicht weiter vertieft; vgl. dazu aber ausführlich: Blyth/Driscoll (2025, Dekarbonisierung); (dort auch das Zitat; Hervorhebungen im Original).

⁶⁴² COP steht für *Conference of the Parties*, die weltweit bedeutendste Koordinationsplattform für globale Klimapolitik; vgl. dazu überblickartig: UN (2025, Climate).

⁶⁴³ Vgl. zu diesen Konflikten und möglichen „Tradeoffs“ ausführlich auch: WWF (2024, Planet), S. 48.



Es wird immer deutlicher, dass die Trump-Regierung die Dekarbonisierung nicht nur in den USA, sondern weltweit stoppen will.

Blyth/Driscoll (2025, Dekarbonisierung)



Besondere Relevanz der Klimakippelemente und Climate Tipping Points

Viele dieser Fragen sind derzeit – in der einen oder anderen Form – Gegenstand intensiver politischer Diskussionen. Sie bilden gleichzeitig auch den Rahmen für die **supranationalen Prozesse** zur Koordination globaler Klimapolitik – exemplarisch auf den jährlich von der UN ausgerichteten „COP-Weltklimakonferenzen“.⁶⁴²

- ▶ Viele der (möglichen) Antworten auf diese Fragen liegen außerhalb des hier verfolgten Analyseansatzes. Dennoch spielen sie eine entscheidende Rolle beim rationalen Umgang mit dem Klimawandel, auch auf der Mikro- und Makroebene eines Landes wie Deutschland.

Denn: Wenn der individuell gespürte (oder auferlegte) Anpassungsdruck an bestimmte Notwendigkeiten oder Folgewirkungen des Klimawandels zu hoch wird und eine implizite **Belastbarkeitsgrenze** überschreitet, werden entsprechende Anstrengungen schnell negiert oder wieder beendet („Überforderung“). Andererseits ist es auch ein zentraler Anspruch der **Generationengerechtigkeit**, spätere (zeitverzögert eintretende) Folgen des Klimawandels und deren Bewältigung nicht hauptsächlich auf nachfolgende Generationen zu überwälzen – die das Problem ja nicht verursacht haben. Ähnliches gilt für den Aspekt der **länderübergreifenden Gerechtigkeit**. Und schließlich liegt ein zentraler Aspekt der gesellschaftlichen **Daseinsvorsorge** genau darin, notwendige Vorbereitungen und Anpassungen im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels vorzunehmen – so schnell wie möglich, aber auch möglichst effizient und umfassend.⁶⁴³

In diesem **Trilemma** bewegen sich derzeit beim Thema Klimawandel viele der Hauptachsen im politischen und gesellschaftlichen Diskurs. Hinzu kommen meist noch Fragen nach einer stärkeren Rolle für **neue Technologien** sowie individuelle **nationale Interessen** (mit einigen ölproduzierenden Ländern sowie speziell den USA als prominenten Negativbeispielen). (Vgl. dazu überblickartig auch Abb. 74).

Die wichtigsten Herausforderungen für Politik und Gesellschaft liegen somit vor allem darin, eine Vielzahl konfligierender Ziele und erforderlicher Maßnahmenpakete sinnvoll, ausgewogen und möglichst gerecht auszubalancieren, ohne dabei aber das wichtigste Ziel aus dem Auge zu verlieren:

- ▶ **Eine möglichst zuverlässige und dauerhafte Einhaltung des „kritischen Pfads“ von 1,5-2°C der globalen Erwärmung.**

Die Wichtigkeit sowie die Dringlichkeit speziell des 1,5°C-Ziels erscheinen umso deutlicher, wenn dieser Wert aus der Perspekti-

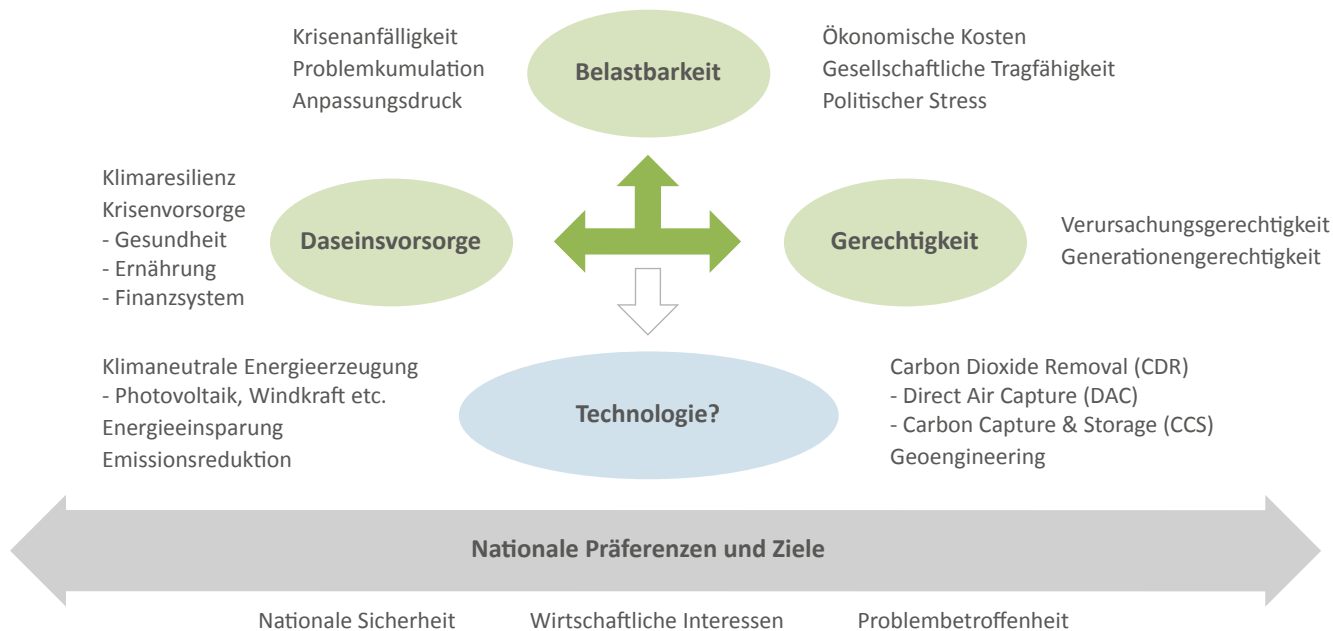
ve der *Climate Tipping Points* und deren oftmals unterschätzten Risiken und Folgewirkungen betrachtet wird. Wie bereits ausgeführt wurde, zeigen einige der wichtigsten planetaren Kippunkte eine **hohe thermische Sensitivität** und könnten bereits **im Bereich um 1,5°C globaler Erwärmung** ausgelöst werden.⁶⁴⁴

▶ Dazu zählen insbesondere die **Eisschilde** in Grönland sowie der Westantarktis – mit der Folge eines deutlichen Anstiegs des Meeresspiegels und anderer dynamischer Wechselwirkungen – sowie mögliche **Veränderungen wichtiger Meeresströmungen wie des Subpolarwirbels** (vgl. dazu überblickartig: oben, Tab. 2, S. 135).

Wie ebenfalls bereits gezeigt wurde, könnten daraus weitere **systemische Rückkopplungseffekte** auch in anderen Bereichen des Erdsystems ausgelöst werden, was eine **abrupte Potenzierung** negativer Umwelt- und Klimafolgen bewirken könnte. Diese **progressive Dynamik** wird aber in vielen Klimadiskussionen in Politik und Gesellschaft offenbar noch immer unterschätzt. Dabei gilt:

▶ Diese Dynamik wäre mit jeder weiteren (auch nur marginalen) Erwärmung über den kritischen Schwellenwert hinaus noch **um einiges stärker** – und damit viel gefährlicher.⁶⁴⁵

Abb. 74: Trilemma des politischen und gesellschaftlichen Diskurses zum Klimawandel



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung

⁶⁴⁴ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 3-5.

⁶⁴⁵ Vgl. zu allen genannten Punkten bereits ausführlich: oben, Kap. 3-5.



Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points.

Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points)



Bereits die Klimaforscher *Armstrong McKay et al.* (2022) erklären auf Grundlage einer ausführlichen Analyse, dass schon bei einem relativ moderaten Niveau der Erderwärmung von 1,5 bis knapp 2°C „einige“ der zentralen Klimakippunkte ausgelöst werden dürften – dass aber ein Anstieg entlang des derzeit realistischen **Pfades von mindestens 2 bis 3°C** (derzeit erwartet: 2,2-3,4°C) das Ergebnis **signifikant verschärfen dürfte**:

- ▶ „Several tipping points may be triggered in the Paris Agreement range of 1.5 to <2°C global warming, with **many more likely at the 2 to 3°C** of warming expected on current policy trajectories.“⁶⁴⁶

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein **besseres Verständnis** der *Climate Tipping Points* und deren **nichtlinearer Dynamik** in allen derzeit stattfindenden Klimadiskussionen von absolut zentraler Bedeutung ist – ebenso wie deren **stärkere Berücksichtigung** im Rahmen öffentlich vertretener Klimaszenarien und „politisch“ aufbereiteter Sachstandsberichte (wie etwa der IPCC-Reports).⁶⁴⁷

Folgen des Nichthandelns – das „Hothouse-Szenario“

Sollten die im *Pariser Klimaabkommen* 2015 von über 190 Staaten festgelegten Klimaziele verfehlt und deutlich über-

schritten werden (was derzeit sehr wahrscheinlich ist), so hat die Klimawissenschaft dazu eine **klare Warnung**:

- ▶ Die Erde würde dann relativ schnell und weitgehend unaufhaltsam weitere wichtige „*Climate Tipping Points*“ auslösen – oder zumindest deren jeweilige **Kippdynamik in Gang setzen**.
- ▶ Nach Einschätzung führender Klimaforscher, und so auch dargelegt von *Weltklimarat* (2024), steigt dieses Risiko bereits mit **jedem zehntel Grad an Erwärmung überproportional**.⁶⁴⁸



Risks and projected adverse impacts and related losses and damages from climate change escalate with every increment of global warming.

IPCC (2024, Statements)



Das daraus resultierende Szenario wäre dann – mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit – durch ein gegenseitiges „Aufschaukeln“ zahlreicher Kippdynamiken gekennzeichnet. Dies hätte (wie bereits in Kap. 4 und 5 dargelegt) eine anhaltende, progressive und **typisch „nichtlineare“ Beschleunigung der Erderwärmung** sowie weiterer extrem unvorteilhafter Klimaänderungen zur Folge.

- ▶ Letztlich besteht das Risiko, dass sich das Erdklima – nach Überschreitung eines „**planetaren Kippunkts**“ – innerhalb nur weniger Jahre oder Jahrzehnte in einen (aus heutiger Sicht) **tendenziell lebensfeindlichen Zustand** bewegen könnte. Derartige Überlegungen sind in der aktuellen Klimadiskussion auch als „**Hothouse Szenario**“ bekannt.⁶⁴⁹

⁶⁴⁶ Armstrong McKay et al. (2022, Climate Tipping Points); (Hervorhebungen durch Verfasser). [Anmerkung des Verfassers: Wie schon an anderer Stelle mehrfach ausgeführt wurde, hat der aktuelle Pfad der Erderwärmung die hier zitierten Angaben bereits überschritten und liegt derzeit bei rund 2,2°C (1,7-3,4); vgl. dazu: Climate Action Tracker (2024, Crisis); Climate Action Tracker (2025, Thermometer).

⁶⁴⁷ Diese Dringlichkeit ist inzwischen zumindest teilweise erkannt; im kommenden *IPCC Report AR7 (2028/2029)* erscheint deshalb – zumindest gemäß heutigem Stand – ein eigenes Kapitel zur Problematik der *Climate Tipping Points*; vgl. dazu: IPCC (2028/2029, Report); (noch ausstehend).

⁶⁴⁸ Vgl. dazu ausführlich: IPCC (2023, Statements).

⁶⁴⁹ Vgl. dazu ausführlich die grundlegende Untersuchung von: Steffen et al. (2018, Trajectories). Ergänzend dazu auch: PIK (2018, „Heißzeit“); sowie: The Conversation (2018, Hothouse). Eine gute Zusammenfassung möglicher Auswirkungen bietet auch die Analyse von: WEF (2024, Inaction); (insbesondere die Darstellung auf S. 10).

Abb. 75 vermittelt hierzu einen Szenarioausblick auf Grundlage einer Modellsimulation und macht deutlich, wie stark sich der **Erwärmungseffekt einer „Heißzeit“** auswirken würde – ähnlich wie schon heute wären Regionen auf der Nordhalbkugel davon besonders stark betroffen.⁶⁵⁰

Die wesentlichen Grundeigenschaften und Merkmale eines solchen „Heißzeit-Szenarios“ wären:

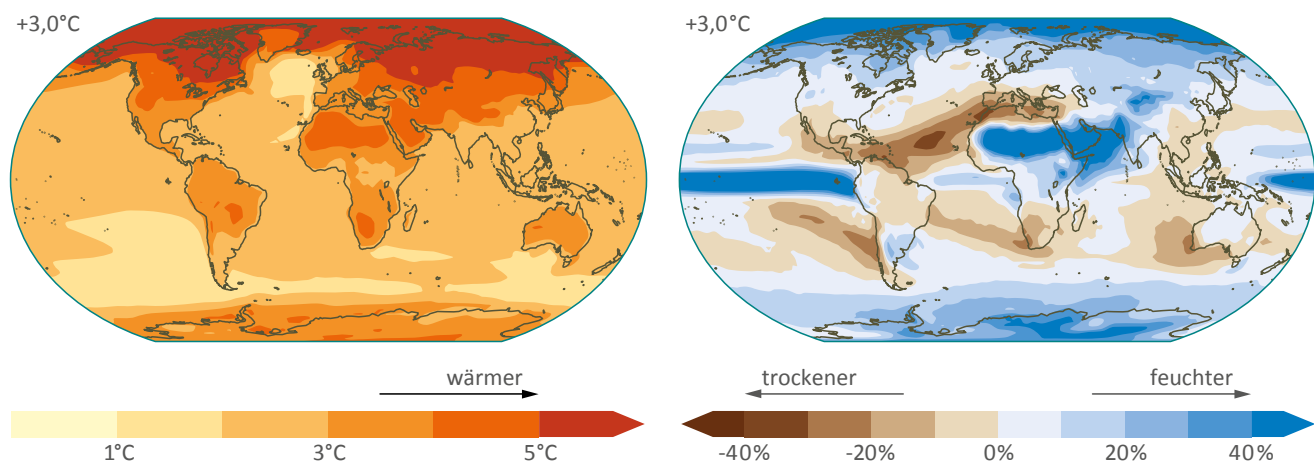
- **globale Temperaturerhöhung** in einer Größenordnung von **3 bis 4°C**,
- **rapides Abschmelzen** der Eisschilde in Grönland und der Westantarktis,
- **signifikanter Anstieg des Meeresspiegels** als Folge schmelzender Eisschilde,
- **großflächige Überflutungen** küstennaher Gebiete und Metropolen sowie Inseln,
- **Abschmelzen großer Gletscherregionen** und Beeinträchtigung wichtiger Flusssysteme,
- **Absterben wichtiger Regenwälder** („Dieback“) mit einer Vielzahl negativer Folgewirkungen,
- **Reduktion der Absorptionsfähigkeit** von Ozeanen und anderen CO₂-Senken,

- **Ausbreitung weltweiter Trockenzonen** und Risiko zunehmender Versteppung,
- **weitgehendes Abtauen von Permafrostböden** und massive Freisetzung von Methan,
- **Verschiebung planetarer Klimazonen** und atmosphärischer Systeme (▷ Monsun),
- **abrupte Zunahme systemischer Rückkopplungen** und Auslösen weiterer Kippunkte,
- **rapide Beschleunigung aller genannten Effekte aufgrund verstärkter systemischer Wechselwirkungen.**⁶⁵¹

Die hier aufgeführten Annahmen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sind aber im Wesentlichen aus den vorangegangenen Analysen zum Prinzip der Klimakippunkte unmittelbar ableitbar. Dabei besteht Grund zu der Annahme, dass sich – ab einem vorher nur schwer bestimmbar „systemkritischen“ Niveau der Erderwärmung – viele der hier lediglich kurz skizzierten Entwicklungen **relativ schnell, sehr konzentriert und mit hoher Dynamik** vollziehen werden.⁶⁵²

► Grund dafür ist die Aktivierung **systemischer Kippkaskaden (Dominoeffekte)**, die sich beim Auslösen kritischer Kippunkte gegenseitig progressiv verstärken und beschleunigen.⁶⁵³

Abb. 75: Globale Temperatur- und Niederschlagsmuster bei Erderwärmung um 3 Grad



Quelle: World Ocean Review (2024, Klimakrise)

⁶⁵⁰ Vgl. dazu ausführlich: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 21.

⁶⁵¹ Vgl. dazu ausführlich auch: WEF (2024, Inaction); sowie grundlegend: Latif (2020, Heißzeit).

⁶⁵² Vgl. dazu insbesondere die Analyse von: WEF (2024, Inaction).

⁶⁵³ Vgl. zu diesen grundlegenden Zusammenhängen ausführlich bereits: oben, Kap. 3.2.2 sowie 4-5.

Aus dieser Einschätzung, in Kombination mit den klar absehbaren Klimarisiken, wird implizit klar, dass ein „Hothouse-Szenario“ das ultimative Potential repräsentiert, bestehende politische, soziale oder wirtschaftliche Ordnungssysteme massiv unter Druck zu setzen, umzustürzen oder radikal zu verändern!

Zentrale Treiber wären dabei insbesondere:

- eine Vervielfachung extremer **Wetterereignisse**,
- deutlich erschwerte **Lebensbedingungen** auch in bislang gemäßigten Klimazonen,
- zunehmende **Überflutungen** großer Küstenbereiche,
- erhebliche **Zerstörungen** wichtiger Infrastruktur,
- kritische **Gefährdungen** bestehender Energiesysteme,
- massive **Beeinträchtigungen** von Fischerei und Landwirtschaft,
- ernsthafte **Verknappungen** bei der Wasser- und Nahrungsmittelversorgung,
- ein globaler Anstieg klimabedingter **Migration**
- sowie weitere hier nicht näher betrachtete Aspekte.⁶⁵⁴



These threats could materialise in the coming decades, and at lower levels of global warming than previously thought.

Global Tipping Points (2023, Report), S. 12



Die konkreten Dimensionen und Ausprägungen möglicher „Hothouse-Szenarien“ sollen hier nicht weiter vertieft werden. Dennoch dürfen diese keinesfalls ignoriert werden – weder in Politik und Gesellschaft noch aus Sicht der Finanzsysteme sowie der globalen Kapitalmärkte!

- ▶ Qualifizierte klimawissenschaftliche Projektionen sowie entsprechende Risikoanalysen finden sich aber in den umfassenden und sehr detaillierten Ausarbeitungen und Reports des *Weltklimarats* sowie von *University of Exeter, Global Tipping Points*.⁶⁵⁵
- ▶ Einen sehr guten Überblick bietet auch die von *World Economic Forum* (2024) erstellte Analyse „*The Cost of Inaction*“.⁶⁵⁶

Hier geht's direkt zur WEF-Analyse „*The Cost of Inaction*“:



6.5 Zunehmender Handlungsdruck für Politik und Öffentlichkeit

Wie die vorliegende Analyse mit Blick auf das Phänomen der *Climate Tipping Points* klar verdeutlicht, stehen politische Entscheidungsträger – aber auch Wirtschaft, Gesellschaft und Finanzsysteme – weltweit unter **zunehmendem Handlungsdruck**:

- ▶ Der Prozess der Erderwärmung läuft mit hoher Dynamik, deutliche Veränderungen des globalen Klimas sind schon heute deutlich spürbar und die potentiellen Risiken einer weiteren Verschärfung nehmen exponentiell zu – verstärkt durch die nichtlineare Dynamik kritischer und oftmals „systemrelevanter“ *Climate Tipping Points*!

⁶⁵⁴ Derartige „katastrophale“ Szenarioüberlegungen sind bereits Gegenstand verschiedener grundlegender Ausblicke und Sachstandsberichte zum Klimawandel; vgl. dazu etwa: IPCC (2023, Report); sowie: University of Oxford, *Global Tipping Points* (2023, Report).

⁶⁵⁵ Vgl. dazu ausführlich: IPCC (2023, Report), speziell der sehr gute Überblick auf S. 12-19; sowie: University of Oxford, *Global Tipping Points* (2023, Report), dort speziell S. 174-201; analog auch der entsprechende Bericht für das Jahr 2025; unter: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2025, Report).

⁶⁵⁶ Vgl. dazu ausführlich: WEF (2024, *Inaction*).



The need for climate action is unprecedented.

António Guterres, UN-Generalsekretär, 2024



Die zentrale Botschaft der Climate Tipping Points

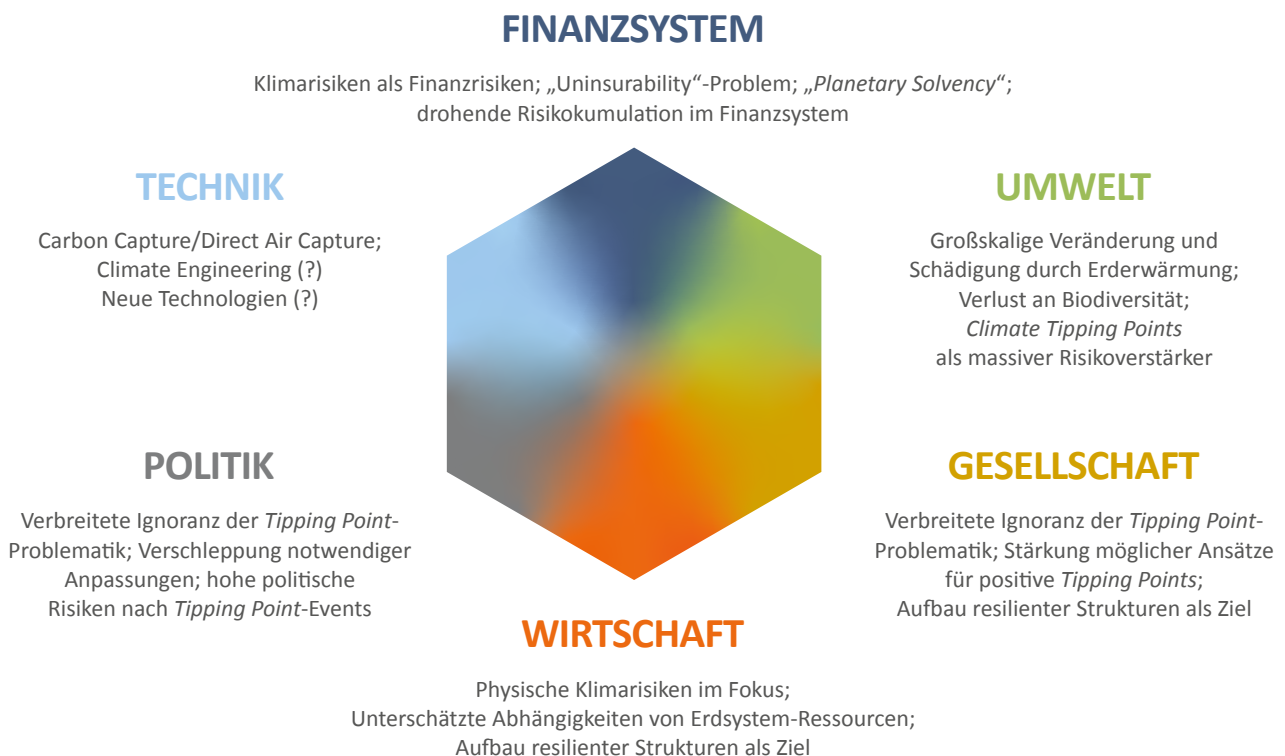
Auch wenn das tatsächliche Zusammenspiel der zentralen Kippunkte noch nicht in allen Einzelheiten klar ist (oder vollständig modelliert werden kann), und auch wenn deren tatsächliche Auswirkungen teilweise noch umstritten sind, ergeben sich aus dem heutigen Stand der Klimawissenschaften sehr **klare Implikationen** in großer Breite, insbesondere jedoch für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft (vgl. Abb. 76).

Die **zentrale Botschaft** wird von führenden Klimaexperten um *Timothy Lenton* und *David I. Armstrong McKay* sowie weiteren Forschenden prägnant zusammengefasst:

► **„Harmful tipping points in the natural world pose some of the gravest threats faced by humanity. Their triggering will severely damage our planet’s life-support systems and threaten the stability of our societies.“⁶⁵⁷**

Auch wenn diese Botschaft zuletzt nicht mehr überall klar durchzudringen scheint, wie speziell in den ölreichen Ländern des Mittleren Ostens sowie – ganz besonders – in den USA, resultieren daraus dennoch sehr konkrete Fragen, Anforderungen und daraus abzuleitende Handlungsoptionen:

Abb. 76: Umfassende und weitreichende Implikationen der Climate Tipping Points



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung

⁶⁵⁷ Zitiert nach: University of Oxford, Global Tipping Points (2023, Report), S. 10; (Hervorhebungen im Original).

- ▶ Die hochspezialisierten und hochindustrialisierten westlichen Gesellschaften müssen nicht nur ihre **Treibhausgasemissionen** weiter **deutlich reduzieren** (eine Selbstverständlichkeit!), sondern gleichzeitig auch ihre **Resilienz** gegenüber möglichen und zunehmend absehbaren (teilweise wohl dramatischen) Klimaveränderungen **massiv verstärken**.
- ▶ Zugleich müssen Länder und Gesellschaften des *Globalen Südens* stärker dabei unterstützt werden, ihre eigene Vorsorge gegen drohende Klimaschäden deutlich zu erhöhen.⁶⁵⁸

Ein Nichthandeln der globalen Gemeinschaft (präziser: ein nur halbherziges Handeln) wäre nach Auffassung führender Klimawissenschaftler gleichbedeutend mit einer Selbstverurteilung der Menschheit zu einem extrem schmerzhaften und unumkehrbaren „*Roadtrip to Hell*“. Dieses plakative Bild wurde von UN-Generalsekretär *Guterres* (2024) geprägt, um die Konsequenzen eines **Überschreitens des 1,5-2°C-Pfads** bei der globalen Erwärmung zu verdeutlichen:

- ▶ „*We are on a highway to climate hell, with our foot still on the accelerator ...*“⁶⁵⁹

Hier geht's direkt zu einem kurzen Video mit der „*highway to climate hell*“-Ansprache von UN-Generalsekretär *António Guterres*:



In seinen Ausführungen bezieht sich *Guterres* (2024) ausdrücklich auf das Risiko einer Annäherung an wichtige *Climate Tipping Points*, die das drohende „*Klimachaos*“ nicht nur unvermeidlich, sondern auch unumkehrbar machen:

- ▶ „*Our planet is fast approaching tipping points that will make climate chaos irreversible.*“⁶⁶⁰

Nur eine rasche, konsequente und vor allem global koordinierte Vorgehensweise könne demnach ein rasches „Abkippen“ des Weltklimas in eine durch zunehmende *Tipping Point*-Dynamiken geprägte „*Klimahölle*“ noch abwenden. Dabei sieht *Guterres* (2024) die **aktuelle Dekade als absolut kritisches Zeitfenster**, um dringend erforderliche Anpassungsschritte überhaupt noch in Gang setzen zu können. Da diese Dekade bereits halb verstrichen ist, erhöht sich der Zeitdruck entsprechend:

- ▶ „*The need for climate action is unprecedented ...*“⁶⁶¹



We are on a highway to climate hell, with our foot still on the accelerator.

António Guterres, UN-Generalsekretär, 2024



Das Konzept der „*Positive Tipping Points*“

Um das primäre Ziel einer möglichst raschen Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen konsequent voranzutreiben, sind nach Ansicht führender Klimaexperten starke Dynamiken sowie das Überwinden „**Positiver Kippunkte**“ erforderlich, insbesondere im gesellschaftlichen Bereich. Dieses Konzept wird unter anderem von den *Global Tipping Points*-Experten im Umfeld der *University of Exeter* vertreten und lässt sich wie folgt beschreiben:

- ▶ „*Crucial to achieving this transformational change are positive tipping point opportunities, where desirable changes in society become self-propelling.*“⁶⁶²

⁶⁵⁸ Genau hier liegen die Hauptziele der regelmäßig stattfindenden *COP-Weltklimakonferenzen*; diese wurden aber zuletzt durch Interventionen einiger Östaaten sowie vor allem der USA massiv „verwässert“; vgl. dazu überblickartig etwa: *bpb* (2024, Ergebnisse); mit einer ausführlichen Analyse auch: *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie* (2024, Geschenk). Aus einer übergeordneten Perspektive dazu sehr eindringlich auch: *UN* (2024, *Climate Hell*).

⁶⁵⁹ *António Guterres*, UN-Generalsekretär, 2024, in einer Rede auf der *Weltklimakonferenz COP 29* in Baku; vgl. dazu ausführlich: *UN* (2024, *Climate Hell*).

⁶⁶⁰ *António Guterres*, UN-Generalsekretär, 2024, in einer Rede auf der *Weltklimakonferenz COP 29* in Baku; (Hervorhebungen durch Verfasser); vgl. dazu ausführlich: *UN* (2024, *Climate Hell*).

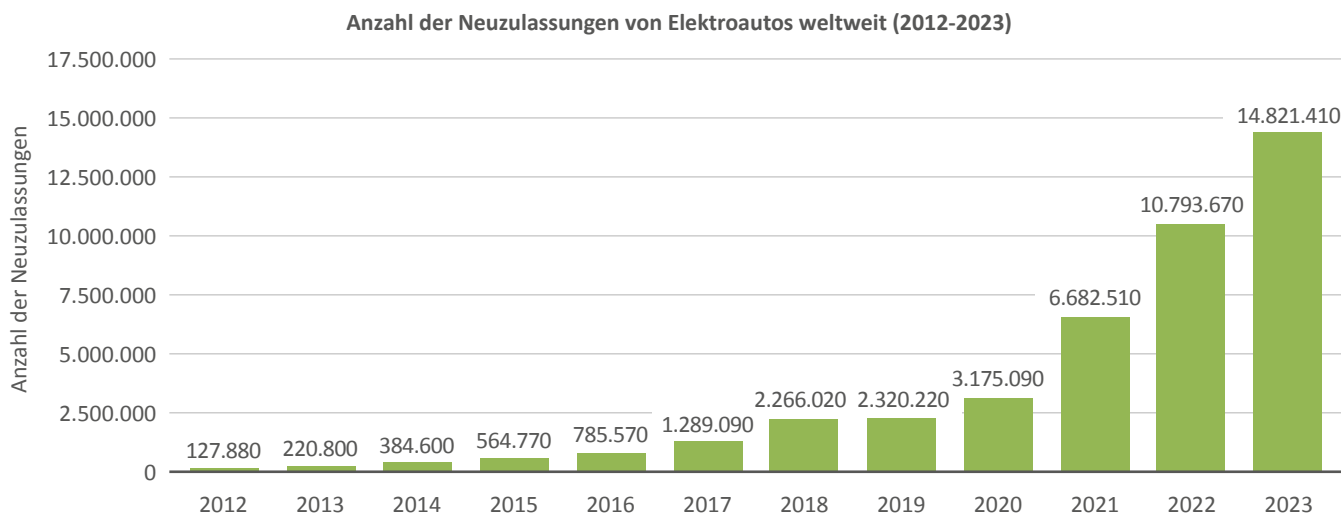
⁶⁶¹ *António Guterres*, UN-Generalsekretär, 2024, in einer Rede auf der *Weltklimakonferenz COP 29* in Baku; (Hervorhebungen durch Verfasser); vgl. dazu ausführlich: *UN* (2024, *Climate Hell*).

⁶⁶² Vgl. dazu ausführlich: *University of Exeter, Global Tipping Points* (2023, Report), S. 10.

Gemeint sind damit **gesellschaftliche Transformations- und Anpassungsmaßnahmen**, die sehr schnell sowohl eine kritische Masse als auch hohe Eigendynamik erreichen und sich danach weiter fortsetzen und laufend selbst verstärken. Ein typisches Beispiel dafür ist der beschleunigte **Wechsel zur**

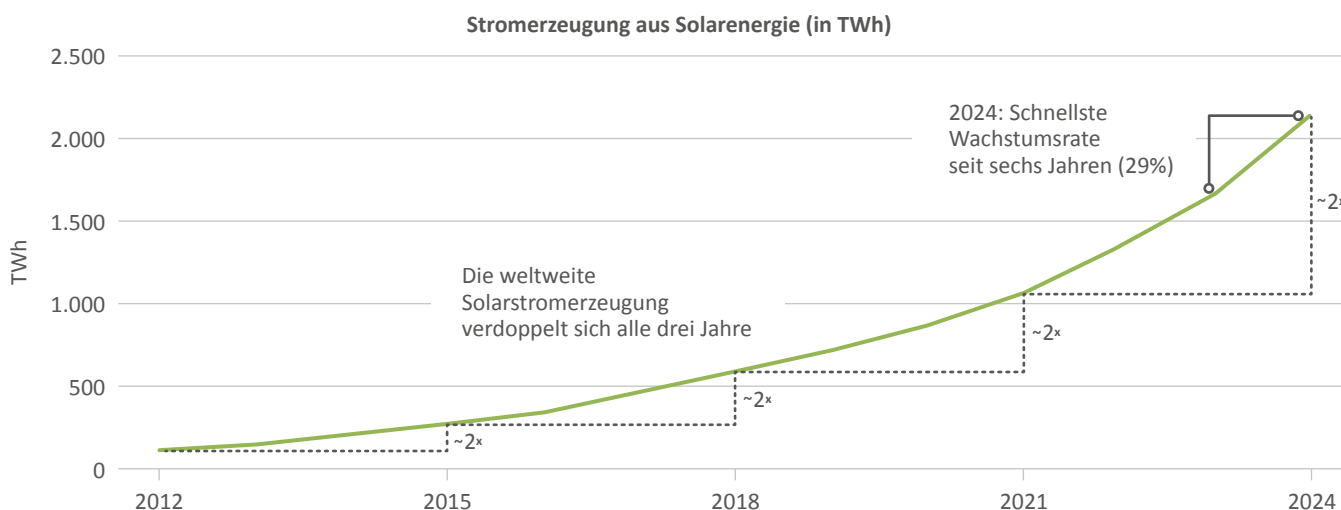
Elektromobilität, den viele Autofahrer (und Autohersteller) bereits vollziehen und damit eine starke **positive Dynamik** ausgelöst haben (vgl. dazu Abb. 77).⁶⁶³ Ein anderes Beispiel ist das nahezu exponentielle Wachstum von **Photovoltaik** bei der weltweiten Stromerzeugung (vgl. dazu Abb. 78).⁶⁶⁴

Abb. 77: Exponentielle Ausbreitung der Elektromobilität



Quelle: Statista (2025, Elektroautos)

Abb. 78: Dynamisches Wachstum der Solarenergie



Quelle: Ember (2025, Review)

⁶⁶³ Vgl. dazu die entsprechenden Daten von: Statista (2025, Elektroautos).

⁶⁶⁴ Vgl. dazu die entsprechenden Daten von: Ember (2025, Review).

Haben derartige Entwicklungen erst einmal einen kritischen Punkt (den jeweiligen *positiven Kippunkt*) überschritten, entsteht im Idealfall eine **positive Rückkopplung**, die sich laufend verstärkt und aus einer scheinbar unbedeutenden Innovation einen massiven globalen Trend erzeugen kann.

- ▶ Grundsätzlich ist dieses Konzept sowohl überzeugend als auch wirkungsvoll, allerdings gibt es derzeit nicht viele vergleichbare Dynamiken, die sowohl schnelle soziale Akzeptanz finden als auch das globale Klima spürbar entlasten würden.⁶⁶⁵

Die *Internationale Energieagentur IEA* (2025) betont die Möglichkeit einer Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels durch schnellen und **dynamischen Ausbau erneuerbarer Energien**, schränkt aber zugleich ein:

- ▶ „... meeting this target would require much faster progress on a much larger scale.“⁶⁶⁶

Bereits *IEA* (2023) sieht die Notwendigkeit einer **Verdreifachung der globalen Kapazitäten** bei erneuerbaren Energien bis zum Ende der Dekade:

- ▶ „Tripling renewable power capacity by 2030 is vital to keep the 1.5°C goal within reach.“⁶⁶⁷

Hier geht's direkt zu einem Video mit den entsprechenden Fakten:



Dennoch ist der Ansatz **positiver gesellschaftlicher Feedbackschleifen und Kippunkte** sinnvoll, um möglichst schnell und verlässlich auf eine Einhaltung „noch akzeptabler“ Erwärmungspfade hinzuwirken. Dazu erklärt *Global Tipping Points* (2023):

- ▶ „... positive tipping point opportunities – even as damaging events escalate – can create a powerful counter effect, avoiding spiralling disaster.“⁶⁶⁸

⁶⁶⁵ Im Gegenteil gibt es inzwischen neue Entwicklungen rund um die Ausbreitung von *Künstlicher Intelligenz (KI)* mit entsprechend hochskalierten Rechenzentren, die einen enormen (zusätzlichen) Energieverbrauch verursachen; vgl. dazu überblickartig etwa: FERI Cognitive Finance Institute (2024, Energiehunger); Visual (hier auch dargestellt in Abb. 80). Vgl. in diesem Sinne auch bereits eine frühere ausführliche Analyse des *FERI Cognitive Finance Institute* unter: Bartenwerffer (2020, Ressourcenverbrauch).

⁶⁶⁶ IEA (2025, Climate Change).

⁶⁶⁷ IEA (2023, Tripling); ausführlich erläutert auch im Video unter: IEA (2023, Energy).

⁶⁶⁸ University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 16; zu entsprechenden „Positive Tipping Point“-Konzepten dort auch sehr ausführlich: Section 4, S. 278-368.

⁶⁶⁹ Vgl. dazu die entsprechenden Szenarioberechnungen der Analyse „A positive tipping cascade in power, transport and heating“ aus dem Umfeld der *University of Exeter*; unter: Nijse et al. (2024, Cascade).

⁶⁷⁰ Vgl. dazu ausführlich: Nijse et al. (2024, Cascade).

Für eine wirksame Verlangsamung oder sogar Umkehrung aktueller Trends der Erderwärmung – einschließlich einer verlässlichen Einhaltung des 1,5°C-Ziels – wären jedoch derart **gravierende Eingriffe** in das Weltwirtschaftssystem sowie in individuelle Konsum- und Verhaltensmuster erforderlich, dass dies auf absehbare Zeit kaum realistisch erscheint.⁶⁶⁹

- ▶ Folglich muss eine rationale Klimapolitik mit hoher Priorität auf eine Steigerung der **Resilienz gegenüber klimatischen Veränderungen** abzielen, gleichzeitig aber auch verstärkt das Potential von „positive feedback loops“ und „positive tipping points“ in Wirtschaft und Gesellschaft aktivieren.

Das Konzept **Positiver Kippunkte** sowie dessen grundsätzliche Umsetzbarkeit – speziell in den Bereichen *Energieerzeugung, Transport/Verkehr* sowie *Heizung* – werden im Rahmen einer eigenständigen Analyse führender Klimaforscher der *University of Exeter* explizit erörtert.⁶⁷⁰

Hier geht's direkt zur Publikation:

In einem kurzen Videokommentar vermittelt *Timothy Lenton*, Hauptinitiator der *Global Tipping Points Reports* und einer der weltweit führenden Klimaexperten, grundlegende und durchaus persönliche Einschätzungen zum Thema „Kippunkte“.

Hier geht's direkt zum Video: „*Global Tipping Points: The future is ours to choose*“.



6.6 Grundlegende Anforderungen und Handlungsoptionen

Die vorliegende Analyse macht deutlich, dass die Weltgemeinschaft an einem **sehr kritischen Punkt** angelangt ist: Einerseits droht – mit hoher wissenschaftlicher Prognose-sicherheit – ein äußerst problematisches und in Teilen sogar katastrophales Klimaszenario. Andererseits jedoch könnten – bei konsequentem und global koordiniertem Handeln – besonders bedrohliche Entwicklungen wohl noch deutlich abgemildert oder ganz verhindert werden. Daraus resultiert ein Dilemma mit **extrem hohem Handlungsdruck**, das in aktuellen Klimakonferenzen deutlich spürbar ist und von Klimaforschern immer dringlicher hervorgehoben wird.

- ▶ Das „**worst case**“-Szenario liegt in einem schnellen – und unumkehrbaren! – „Umkippen“ des Weltklimas in einen **neuen Systemzustand**, der durch den Begriff „**Hothouse**“ charakterisiert werden kann.⁶⁷¹

Diese Situation konfrontiert politische Entscheidungsträger, aber auch Unternehmer, Investoren und Vermögensinhaber mit einer **extrem komplexen und risikoreichen Ausgangslage** für zukünftige Handlungen und Entscheidungen. In diesem Sinne erklärt dazu auch *World Economic Forum* (2025):

- ▶ „**The decade ahead will be pivotal as leaders will be confronted with increasingly complex global risks.**“⁶⁷²

Einer der absolut zentralen Parameter in diesem Dilemma ist das **Prinzip der Klimakippunkte** („*Climate Tipping Points*“), die mit Blick auf das globale Klima sowie das gesamte Erdsystem sehr **schnell und abrupt großskalige Veränderungen von enormer Tragweite** auslösen können. Denn:

- ▶ Das Prinzip der *Climate Tipping Points* entspricht mit seinen **hochdynamischen Eigenschaften** – die sich aber meist über längere Zeiträume hinweg entfalten – nicht dem „normalen“ Erfahrungshintergrund vieler Menschen.⁶⁷³
- ▶ Dieses **grundlegende Kognitionsdefizit** erschwert offenbar rationale Abwägungen zwischen notwendigen Anpassungsschritten „heute“ und möglichen Konsequenzen „morgen“. ⁶⁷⁴

Als **Kognitionsdefizit** wird hier das menschliche Grundproblem einer oftmals verzerrten oder unvollständigen Informationswahrnehmung sowie einer nur begrenzt rationalen Informationsverarbeitung verstanden. Es lässt sich auf biologische bzw. neuronale Limitationen zurückführen, die im Zusammenspiel mit mentalen Prägungen und emotionalen Reflexen typische menschliche Verhaltensweisen stark determinieren und prägen.⁶⁷⁵

Enger Spielraum und knappes Zeitfenster für Gegenmaßnahmen

In der simplen Übersetzung auf „*wahrnehmbare Realitäten*“ bedeutet das Prinzip der Klimakippunkte nichts anderes als eine **unumkehrbare Veränderung** wichtiger Kernelemente des Erdklimas:

- ▶ „*Das heißt, sogar wenn die Temperatur nicht weiter ansteige, würde ein Eisschild, ein Ozean oder ein Regenwald, sobald er einen Kippunkt überschritten hat, immer weiter in einen neuen Zustand steuern.*“⁶⁷⁶

⁶⁷¹ Vgl. dazu den Großteil der vorangegangenen Ausführungen, insbesondere Kap. 6.5.

⁶⁷² WEF (2025, Risks), S. 11; (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁶⁷³ Hierbei geht es insbesondere um Eigenschaften wie „*Nichtlinearität*“ und „*Rückkopplung*“, die zu abrupten, sprunghaften und „*unerwartet schnellen*“ Entwicklungen führen; vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 4.

⁶⁷⁴ Hier zeigt sich ein zentrales Problem, das in der Kognitionswissenschaft auch als „*menschliche Komplexitätsaversion*“ bekannt ist. Dieses neuronal bedingte Kognitionsdefizit verhindert in komplexen Situationen oftmals rationale und sinnvolle Lösungswege; vgl. dazu grundlegend: Rapp/Cortés (2017, Cognitive).

⁶⁷⁵ Vgl. dazu ausführlich und mit zahlreichen Einzelnachweisen: Rapp/Cortés (2017, Cognitive).

⁶⁷⁶ PIK (2022, Klima-Kippunkte).

Folglich müssen alle denkbaren Gegenmaßnahmen von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft darauf abzielen, das **Auslösen kritischer Klimakippunkte nach Möglichkeit zu verhindern**. Dieser Weg dürfte aber in einigen Fällen schon heute kaum noch erfolgversprechend sein, denn:

- ▶ Aktuelle Klimastudien sehen bei einigen zentralen Kipp-elementen bereits klare Anzeichen für eine **positive Kipp-dynamik**, die entweder bereits begonnen hat oder sich unmittelbar an einen Kippunkt befindet.⁶⁷⁷

Dazu erklärt der renommierte Klimaforscher *Armstrong McKay* (2024):

- ▶ „Wir sehen bereits Anzeichen für eine Destabilisierung in Teilen der westantarktischen und grönländischen Eisschilde, in Permafrostgebieten, im Amazonas-Regenwald und möglicherweise auch in der atlantischen Umwälzzirkulation.“⁶⁷⁸



Tipping points: Window to avoid irreversible climate impacts is ,rapidly closing‘.

Carbon Brief (2025, Window)



Trotz dieser beunruhigenden Entwicklung halten viele Klimawissenschaftler ein „knappes Vermeiden“ besonders kritischer Kippunkte derzeit „gerade noch“ für möglich – allerdings nur bei schnellstmöglichem Handeln und maximaler Anstrengung. Der entscheidende Schlüssel dafür liegt – wie schon seit Beginn der anthropogenen Erderwärmung – in einer strikten **Reduktion klimaschädlicher Emissionen**. In diesem Sinne erklärt auch *Armstrong McKay* (2024):

- ▶ „Die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens von Kipp-punkten kann durch eine rasche Reduzierung der Treibhausgasemissionen verringert werden.“⁶⁷⁹

Hierzu existiert ein interessanter Aspekt – in Form der sogenannten „*Overshooting-These*“:

Manche Klimawissenschaftler halten es für denkbar, dass ein nur **relativ kurzes Überschreiten** des „gerade noch vertretbaren“ Niveaus anthropogener Erwärmung (bekannt als „*Overshooting-Szenario*“) möglicherweise auch ein gewisses „Zurückpendeln“ und eine **nachfolgende Selbststabilisierung des Klimasystems** ermöglichen würde.

Zwingende Voraussetzung für diese – bislang noch umstrittene – Ergebnisvariante wäre aber dennoch eine **anhaltende und massive Reduktion klimaschädlicher Emissionen**.⁶⁸⁰

Maßgeblich ist dabei folgende Erkenntnis: „Die globale Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten auf 1,5 Grad zu begrenzen, ist mittlerweile kaum noch möglich – zumindest nicht, ohne dabei für einige Jahrzehnte über das Temperaturziel hinauszuschießen (*Überschuss-Szenario*).“⁶⁸¹

Bei genauer Betrachtung hat die Menschheit mit ihren Bemühungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in den letzten Jahren tatsächlich wichtige – wenngleich noch ungenügende – Fortschritte erzielt. Entscheidend dafür ist vor allem der **verstärkte Einsatz „klimaneutraler“ Energieerzeugung**, insbesondere durch Photovoltaik, Windkraft und andere „grüne“ Technologien. Die gute Nachricht ist, dass in den letzten Jahren nicht nur in Europa, sondern auch in den USA und ganz besonders in China, die Kapazitäten für klimaneutrale Energieproduktion massiv ausgebaut wurden.⁶⁸²

⁶⁷⁷ Vgl. dazu Überblickartig: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); analog auch: Carbon Brief (2025, Window).

⁶⁷⁸ *David I. Armstrong McKay*, zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte).

⁶⁷⁹ *David I. Armstrong McKay*, zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte). Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 3.1.

⁶⁸⁰ Auf diesen Aspekt verweist auch der Erdsystemforscher und Klimaexperte *Nico Wunderling* vom Fachbereich C³S der *Goethe-Universität* Frankfurt; vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 4.6 (Expertenbeitrag).

⁶⁸¹ World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 43. Vgl. zu diesem Szenario bereits: oben, Kap. 4.6 (Expertenkommentar); auch zitiert unter: Wunderling (2025, „Overshoot“).

⁶⁸² Vgl. dazu etwa Daten der *International Renewable Energy Agency* (IRENA): „Solar- und Windenergie verzeichnen nach wie vor den größten Zuwachs und machten zusammen 96,6% des gesamten Nettozubaues an erneuerbaren Energien im Jahr 2024 aus. Mehr als drei Viertel des Kapazitätsausbaus entfielen auf die Solarenergie, die um 32,2% auf 1.865 GW anstieg, gefolgt von der Windenergie mit einem Wachstum von 11,1%.“; auf China entfallen im Jahr 2024 mit rund 278 Gigawatt rund 60% der gesamten neu installierten Kapazitäten bei Photovoltaik; vgl. dazu ausführlich: IRENA (2025, Rekordzuwachs).

- ▶ Aktuelle Daten der Energieagentur IRENA (2025) zeigen einen „... massiven Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2024 auf beachtliche 4.448 Gigawatt (GW).“ Und weiter:
- ▶ „Mit einem Zubau von 585 GW machten erneuerbare Energien im Jahr 2024 über 90% des gesamten weltweiten Stromausbaus aus.“⁶⁸³

Der Gesamteffekt dieser Maßnahmen ist keinesfalls zu unterschätzen: So entfielen Ende 2024 bereits **rund 46%** der weltweit installierten Energieerzeugungskapazitäten auf erneuerbare, also prinzipiell klimaschonende Technologien.⁶⁸⁴

- ▶ Wie Abb. 79 zeigt, ist in den letzten Jahren der **Anteil klimaneutraler Energien** bei der weltweiten Stromerzeugung stark gewachsen und könnte – speziell bei globaler Skalierung – die planetare Emissionsbilanz tatsächlich in die Nähe eines „gerade noch“ akzeptablen Pfades führen, möglicherweise unter Inkaufnahme eines temporären „Overshooting“.⁶⁸⁵

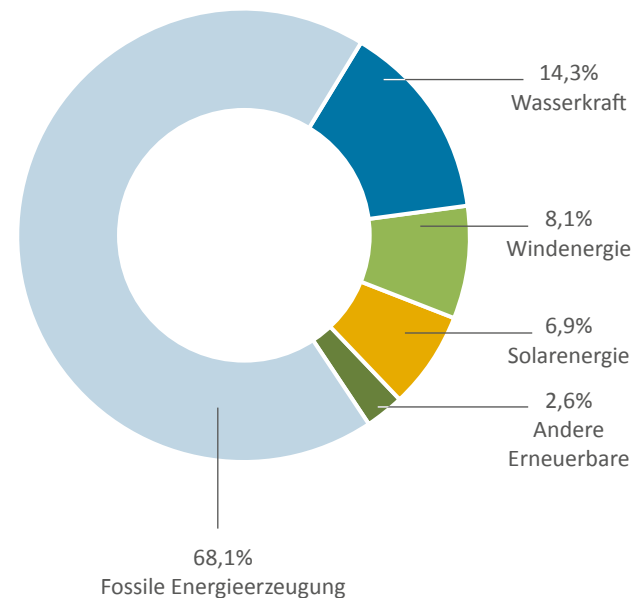
Die derzeit stattfindende **massive Transformation** im Bereich der Primärenergieerzeugung ist ein sehr wichtiger Aspekt. Aufgrund starker Kostendegressionseffekte könnte sich diese Entwicklung weiter fortsetzen und sogar beschleunigen. Besonders vorteilhaft ist dabei, dass gemäß aktuellen Analysen inzwischen 91% aller neuen Projekte zur Erzeugung erneuerbarer Energien **kosteneffizienter** sind als konventionelle Anlagen auf Grundlage fossiler Energieträger.⁶⁸⁶

Ein wichtiger Faktor und zugleich Treiber dieser Transformation ist **China**: Die Volksrepublik ist einerseits noch immer – mit großem Abstand – der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen, andererseits aber auch das Land mit dem schnellsten und stärksten **Ausbau**

Abb. 79: Weltweit zunehmende Relevanz erneuerbarer Energien

Weltweite Stromversorgung 2024

Anteil der erneuerbaren Energien: über 30%



Quelle: JUWI (2025, Energien)

erneuerbarer Energiequellen (und zugleich der weltweit dominante Anbieter klimaneutraler Technologien).⁶⁸⁷ Dazu erklärt etwa DNV (2025):

„China is responsible for 33% of the world’s energy-related CO₂ emissions today, but this will reduce to 22% by 2050. (...) China’s power mix shifts from 30% renewable today to 88% by 2050.“⁶⁸⁸

⁶⁸³ IRENA (2025, Rekordzuwachs).

⁶⁸⁴ „By the end of 2024, renewables accounted for 46% of global installed power capacity.“; IRENA (2025, Statistics).

⁶⁸⁵ Vgl. zur „Overshooting-These“ ausführlich bereits: oben, Kap. 4.6; dort auch Expertenbeitrag des Klimaforschers Nico Wunderling; zitiert unter: Wunderling (2025, „Overshoot“).

⁶⁸⁶ Vgl. dazu: IRENA (2025, Cheaper): „Notably, 91% of new renewable power projects commissioned last year were more cost-effective than any new fossil fuel alternatives.“

⁶⁸⁷ Vgl. dazu: Tagesschau (2024, China); ntv (2025, CO₂-Zenit); Statista (2025, China); sowie: Klimareporter (2025, Doppelstrategie): „Im Jahr 2024 hat China doppelt so viele Solaranlagen und Windräder installiert wie der Rest der Welt zusammen.“ Analog auch JUWI (2025, Energien): „2024 nahm das bevölkerungsreichste Land der Welt 248 GW Photovoltaik in Betrieb – fast 63 Prozent des weltweiten Zubaus. Auch bei der Windenergie lagen die Chinesen vorn: Fast 80 GW Windparkleistung gingen dort neu in Betrieb, mehr als zwei Drittel der gesamten weltweit neu errichteten Leistung.“

⁶⁸⁸ DNV (2025, Outlook). (Die DNV Group ist ein führender Anbieter von globalen Risikomanagement-Services).

Problematisch ist allerdings, dass gleichzeitig auch der **weltweite Energiebedarf** weiter stark ansteigt – nicht zuletzt als Folge massiver Investitionen in KI-basierte Großrechenzentren (vgl. dazu exemplarisch Abb. 80). Mögliche Effizienzgewinne und theoretische Klimavorteile einer forcierten klimafreundlichen Energiewende werden so zumindest teilweise wieder aufgezehrt.

Ebenfalls problematisch ist in diesem Kontext auch die mögliche Rolle von **Wasserstoff**: Gemäß zahlreicher Planungen zur Klimatransformation sollte Wasserstoffgas klimaneutral erzeugt werden und als alternativer Energieträger dazu beitragen, eine Vielzahl industrieller Prozesse sowie Teile der Mobilitätskette (Automobile, Lastwagen, Schiffe, Flugzeuge etc.) dauerhaft zu „dekarbonisieren“.⁶⁸⁹

Aktuell allerdings stößt diese Strategie auf zunehmende Skepsis, nicht zuletzt, weil anhaltende Kosten-

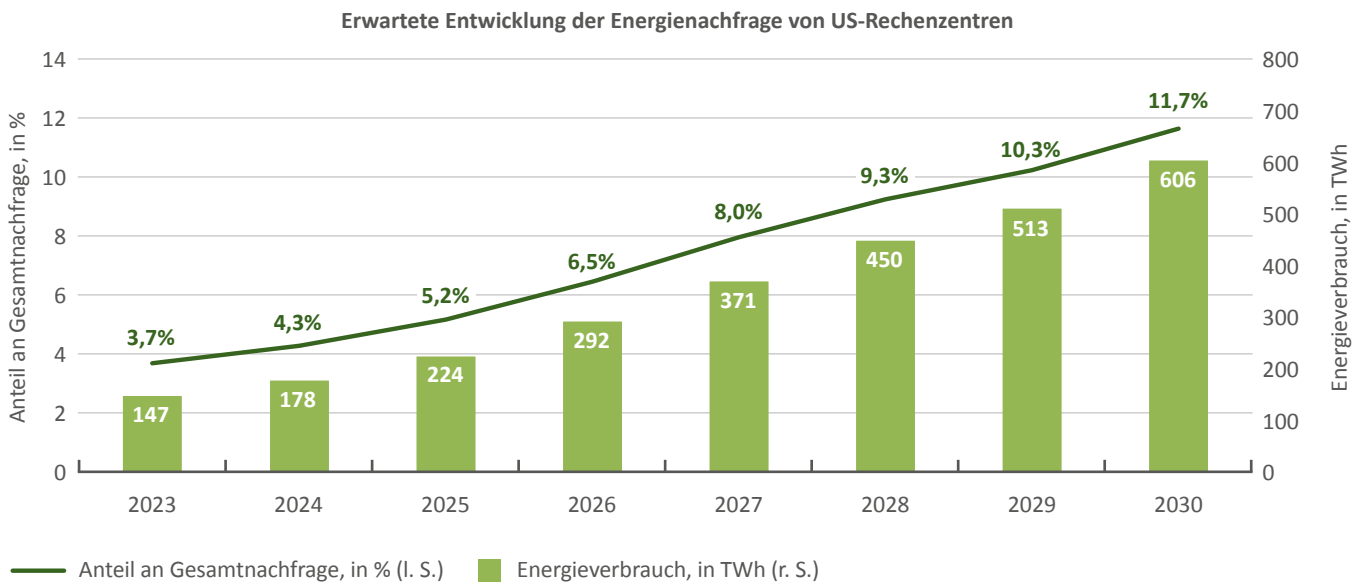
nachteile sowie rigide Regulierung einen industriellen Einsatz – und damit ein zeitnahes „Hochlaufen“ einer möglichst klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft – deutlich behindern.⁶⁹⁰

► Zu diesem Thema hat das *FERI Cognitive Finance Institute* bereits 2022 zusammen mit dem *Labor für Wasserstoff- und Brennzellentechnologie* der *Hochschule RheinMain* eine ausführliche Grundsatzstudie veröffentlicht.⁶⁹¹

Hier geht's direkt zur Kurzversion der Studie „Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft – Grundlagen, Konzepte und mögliche Anwendungsbereiche“.



Abb. 80: Massiv steigender Energiebedarf von KI-Rechenzentren



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025; Daten: McKinsey (Werte für mittleres Szenario)

⁶⁸⁹ Vgl. dazu speziell mit Blick auf Europa die „Wasserstoff-Strategie“ der EU-Kommission: EU-Kommission (2020, Hydrogen); sowie: EU-Kommission (2025, Hydrogen).

⁶⁹⁰ Vgl. in diesem Sinne etwa: Bloomberg (2025, Dream); Handelsblatt (2025, Scheitern).

⁶⁹¹ Vgl. dazu ausführlich: Scheppat et al. (2022, Wasserstoff).

Hohe Dringlichkeit weiterer Maßnahmen – Climate Engineering als Lösung?

In Anbetracht des aktuellen Pfads der Erderwärmung – der sich derzeit in **Richtung von mindestens 2-3°C** bewegt – ist nach Ansicht des *Weltklimarats* und anderer relevanter Stimmen umgehend eine deutliche Verminderung gegenwärtiger Treibhausgasemissionen erforderlich.⁶⁹²

Darüber hinaus muss aber auch eine **signifikante Reduktion bereits getätigter Emissionen** herbeigeführt werden, was über eine längere Zeit hinweg eine **„netto negative“ Emissionsbilanz** erfordert:

- ▶ „The IPCC estimates that by mid-century, we **will need to remove 3-12 gigatons of CO₂ from the air every year** to maximize our chances of limiting global warming to 1.5°C above pre-industrial levels.“⁶⁹³

Um ein ungebremstes „Abkippen“ in risikoreiche „*Hothouse-Szenarien*“ zu verhindern, sind offensichtlich also noch deutlich weitergehende Schritte erforderlich. Hier kommen in jüngerer Zeit – neben Programmen zur massiven Aufforstung und dem Ausbau anderer natürlicher Entnahmewege – vor allem **technologisch geprägte Ansätze** ins Spiel, darunter eine gezielte Entnahme von CO₂ aus der Luft sowie verschiedene direkte Eingriffe in den Wärmehaushalt des Planeten.⁶⁹⁴

- ▶ Zusammenfassend werden derartige Ansätze auch als **„Climate Engineering“** bezeichnet.⁶⁹⁵

Das erstgenannte Konzept ist eine besondere Variante sogenannter **„Carbon Capture“-Verfahren**, bei denen typischer-

weise CO₂ im Rahmen unterschiedlicher Emissionsprozesse „eingefangen“ oder klimaunschädlich abgeschieden und dauerhaft „eingelagert“ wird (*Carbon Capture and Storage*; kurz CCS). In einer bemerkenswerten Grundsatzentscheidung hat zuletzt auch die Bundesregierung solchen Verfahren zur CO₂-Speicherung eine Zulassung erteilt.⁶⁹⁶

World Economic Forum (2025) geht davon aus, dass Technologien zur Abscheidung und Speicherung von CO₂-Emissionen künftig einen **kritischen Faktor** bei den Bemühungen zu einer breiten „Dekarbonisierung“ wichtiger Wirtschaftsprozesse darstellen:

- ▶ „Carbon capture and storage is at a pivotal moment for decarbonization.“⁶⁹⁷

Einer der wichtigsten Ansätze zur Speicherung und „Endlagerung“ von abgeschiedenem Kohlendioxid sieht vor, dieses in geeignete Gesteinsformationen unter dem Meeresgrund zu verpressen oder in entsprechende Hohlräume einzuleiten. Aufnahmefähige unterirdische Kavernen resultieren vielfach inhärent aus der Offshore-Erdgasförderung und werden in Ländern wie Norwegen bereits zur Einlagerung von CO₂ genutzt – in rund 2.600 Metern Tiefe unter dem Meer.⁶⁹⁸

Allerdings deuten neuere Untersuchungen klar darauf hin, dass die verfügbare planetare Kapazität für eine solche unterirdische Speicherung von CO₂ sehr viel geringer sein dürfte als erhofft – und damit für substantielle Problemlösungsbeiträge nur bedingt geeignet.⁶⁹⁹

⁶⁹² Vgl. dazu die grundsätzliche Aussage von IPCC (2023, Report), S. 98: „Global warming will continue to increase in the near term (2021–2040) mainly due to increased cumulative CO₂ emissions in nearly all considered scenarios and pathways.“

⁶⁹³ Climeworks (2025, Capture); (Hervorhebungen durch Verfasser). Analog auch: IPCC (2023, Report).

⁶⁹⁴ Vgl. dazu überblickartig etwa: Umweltbundesamt (2025, Geoengineering). Zum Aspekt der natürlichen Kohlenstoff-Reduktion vgl.: Umweltbundesamt (2024, Lösungen).

⁶⁹⁵ Vgl. dazu: Umweltbundesamt (2025, Geoengineering).

⁶⁹⁶ Vgl. dazu etwa: Tagesspiegel (2025, CO₂-Speicherung).

⁶⁹⁷ WEF (2025, Capture). Analog auch: DNV (2025, Transition).

⁶⁹⁸ Vgl. dazu grundlegend etwa: World Ocean Review (2024, Kohlendioxid); zur Umsetzung in Norwegen vgl.: Tagesschau (2024, CO₂-Problem); Deutschlandfunk (2025, Einspeicherung); Zeit (2025, Technologie).

⁶⁹⁹ Vgl. in diesem Sinne: ntv (2025, CO₂): „... die globale Kapazität dieses sogenannten CCS (Carbon Capture and Storage) ist (...) wesentlich geringer als bisher angenommen.“; dort unter Verweis auf eine entsprechende Studie von: Gidden et al. (2025, Limit).

Noch wesentlich konsequenter sind Ansätze spezialisierter Technologieunternehmen, die mit Hilfe **riesiger Filteranlagen** CO₂ auf dem Wege des „Direct Air Capture“ (DAC) direkt aus der Luft entnehmen („absaugen“) und anschließend dauerhaft in geeigneten Gesteinsformationen (insbesondere Basalt) oder anderen Lagerstätten binden.⁷⁰⁰

- ▶ Derartige Ansätze werden summarisch als „**Carbon Dioxide Removal**“ (CDR) bezeichnet.⁷⁰¹

Nach Einschätzung des *Weltklimarates* sind Maßnahmen zur nachträglichen CO₂-Entnahme **zwingend erforderlich**, um den Pfad einer maximalen Erwärmung von 1,5 bis 2°C noch einhalten zu können:

- ▶ „Carbon dioxide removal (CDR) will be necessary to achieve net negative CO₂ emissions.“⁷⁰²

Zum Hintergrund und den Potentialen von Carbon Capture sowie einer CO₂-Entnahme aus der Luft hat das FERI Cognitive Finance Institute 2025 eine umfassende Analyse veröffentlicht.⁷⁰³

Hier geht's direkt zur Analyse „Carbon Capture – Dekarbonisierung durch CO₂-Entnahme“:



Viel weniger CO₂ als gedacht kann gespeichert werden.

ntv (2025, CO₂)



Die zweite Vorgehensweise betrifft verschiedenartige technologische Überlegungen, die gesamthaft unter dem Begriff „**Geoengineering**“ zusammengefasst werden. Hierunter fallen diverse Ideen, wie die Erde (oder zumindest Teile davon) künstlich „verdunkelt“ und damit abgekühlt werden könnte:

- Mögliche Vorschläge zielen auf das Ausbringen kleiner **Schwefelkristalle** als sogenannte *Sulfataerosole* direkt in die oberen Schichten der Erdatmosphäre, um so den Verdunkelungs- und Abkühlungseffekt eines großen Vulkanausbruchs zu simulieren.⁷⁰⁴
- Andere Ideen setzen auf die Installation großformatiger **Sonnenspiegel** oder anderer Reflektoren im Weltall, die in einer geostationären Umlaufbahn oder in der Nähe der schwerkraftneutralen *Lagrange-Punkte* positioniert werden könnten – mit dem Ziel, einen Teil der von der Sonne ausgehenden Wärmestrahlung noch im Weltall „abzufangen“.⁷⁰⁵
- Wieder andere Ideen zielen auf eine **künstliche Aufhellung** (oder Ausdünnung) bestimmter Wolkenformationen, um so eine bessere thermische Abstrahlwirkung gegenüber einfallender Sonnenwärme herbeizuführen.⁷⁰⁶
- ▶ Gesamthaft werden diese und ähnliche Verfahren auch als „**Solar Radiation Modification**“ (SRM) bezeichnet.

Bislang sind weder die Kosten noch die Wirksamkeit derartiger Ansätze hinreichend quantifizierbar, ebenso wenig wie das Ausmaß möglicher **Nebenwirkungen** und **unbeabsichtigter Konsequenzen**. Damit stellen derartige Ansätze eines primär technologisch getriebenen *Climate Engineering* die Menschheit vor ein weiteres **Dilemma**: Einerseits könnten – zumindest theoretisch – besonders schwerwiegende Auswirkungen der Erderwärmung damit *möglicherweise* spürbar abgemildert werden. Andererseits würde sich dadurch aber das Erdklima ein weiteres Mal durch menschliche Eingriffe ändern – mit potentiell gravierenden und vorher kaum abschätzbaren Folgeeffekten.⁷⁰⁷

⁷⁰⁰ Vgl. dazu insbesondere die Ansätze der Firma *Climeworks*; ähnlich auch das Startup *Phlair*; vgl. dazu: ntv (2025, Luft). Vgl. zum generellen Hintergrund auch die ausführliche Analyse des *FERI Cognitive Finance Institute* unter: Réthy-Jensen (2025, Capture).

⁷⁰¹ Vgl. dazu: Umweltbundesamt (2025, Geoengineering). Eine gute Darstellung und ausführliche Diskussion dazu bietet auch: World Ocean Review (2024, Klimakrise), S. 43-46.

⁷⁰² IPCC (2023, Report), S. 19.

⁷⁰³ Vgl. dazu ausführlich: Réthy-Jensen (2025, Capture).

⁷⁰⁴ Vgl. dazu grundsätzlich: Umweltbundesamt (2025, Geoengineering).

⁷⁰⁵ Vgl. dazu grundsätzlich: Umweltbundesamt (2025, Geoengineering). Zum physikalischen Hintergrund der *Lagrange-Punkte* vgl. etwa: ESA (2025, Beobachtungsplatz).

⁷⁰⁶ Vgl. dazu überblickartig: Umweltbundesamt (2025, Geoengineering); ergänzend auch: ARD (2025, Klima); Tagesschau (2025, Sonne).

⁷⁰⁷ Vgl. dazu überblickartig: Zeit (2025, Riskant).

- ▶ Zudem wird kritisiert, dass solche Konzepte – und seien sie auch nur rein theoretisch verfügbar – den **Anreiz** zu einer konsequenten Reduktion von Treibhausgasemissionen **deutlich verringern** würden.⁷⁰⁸
- ▶ Verschärfend kommt hinzu: „Durch SRM würde nicht die Ursache des Klimawandels behoben, sondern lediglich die Erderwärmung als ein Symptom adressiert.“⁷⁰⁹

Ausführliche Hintergrundinformationen dazu bieten auch sehenswerte TV-Dokumentationen:⁷¹⁰

Hier geht es direkt zum Video „Kampf ums Klima – Was, wenn jemand die Sonne verdunkelt?“ (Erstausstrahlung: ARD 11.08.2025):



Hier geht es direkt zum Video „Kann Geoengineering das Klima retten?“ (Erstausstrahlung: ARTE 22.01.2022):



Zusammenfassend lässt sich zu den unterschiedlichen Ansätzen des *Climate Engineering* ein **ernüchterndes Fazit** ziehen: Die diversen *CDR-Verfahren* zur Direktentnahme von CO₂ aus der Atmosphäre sind zwar grundsätzlich wirksam, erfordern aber eine **extrem hohe Energiezufuhr**. Aktuelle *DAC-Anlagen* sind deshalb allenfalls in Regionen wie Island rentabel, wo kostengünstige Energie aus natürlichen Quellen verfügbar ist. Hinzu kommt, dass durch *CDR-Anlagen* auf absehbare Zeit **kein spürbarer Effekt** auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre erzielbar sein wird.⁷¹¹

Programme zur Förderung und Wiederherstellung natürlicher CO₂-Senken, wie etwa gezielte **Aufforstung** oder die **Revitalisierung von Mooren**, spielen deshalb zukünftig ebenfalls eine große Rolle bei der Idee einer nachträglichen CO₂-Reduktion. Dabei ist allerdings der **ungünstige Zeitfaktor** zu beachten, denn:

- ▶ Derartige Programme benötigen Zeit für natürliches Wachstum, während gleichzeitig die Erderwärmung ungebremst weiter fortschreitet – und sich damit zwangsläufig auch die erforderlichen Umweltbedingungen kontinuierlich verschlechtern.⁷¹²

Mit Blick auf die Möglichkeiten eines aktiven **Geoengineerings** ist festzuhalten, dass viele der derzeit diskutierten Ideen noch völlig unerprobt sind und erhebliche ökologische sowie geopolitische Risiken aufweisen. Dennoch könnten derartige Ansätze ab einem gewissen Punkt der Erderwärmung nahezu zwangsläufig ins Spiel gebracht werden – quasi als „letzte Kugel im Lauf“.⁷¹³

Bei einer Bewertung derartiger Maßnahmen sollte vorerst der eher vorsichtigen Sichtweise von *Umweltbundesamt* (2025) gefolgt werden, wo insbesondere zu den technischen Ansätzen einer *Solar Radiation Modification (SRM)* festgestellt wird:

- ▶ „Durch SRM kann weder das bisherige Klima konserviert, noch das vorindustrielle Klima wiederhergestellt werden. Es würde ein **unvorhersagbares, neues globales Klima** entstehen, das mit erheblichen regionalen Auswirkungen einhergeht.“⁷¹⁴

⁷⁰⁸ Vgl. zu einer gesamthaften Würdigung: Umweltbundesamt (2025, Geoengineering).

⁷⁰⁹ Umweltbundesamt (2025, Geoengineering). Analog dazu auch der letzte Sachstandsbericht des *Weltklimarates* IPCC (2023, Report), S. 72: „Solar Radiation Modification (SRM) approaches, if they were to be implemented, introduce a widespread range of new risks to people and ecosystems, which are not well understood.“

⁷¹⁰ Vgl. dazu: ARD (2025, Klima); ARTE (2022, Geoengineering).

⁷¹¹ Schätzungen gehen selbst bei größtmöglicher Skalierung nur von einer Größenordnung von allerhöchstens 1% aus. So beläuft sich die heutige maximale Entnahmekapazität der *Climeworks*-Anlagen auf 36.000 t CO₂, rund 1 Millionstel Prozent des Gesamtvolumens an CO₂ in der Atmosphäre, respektive weniger als 1 Promille der jährlich der Atmosphäre neu hinzugefügten Menge an CO₂. (Quelle: Eigene Berechnungen anhand öffentlicher Daten). Vgl. dazu auch: Perplexity (2025, CO₂-Entnahme). Allerdings sieht *Climeworks* selbst ein theoretisches Potential für *DAC*-Technologien in einer sehr viel höheren Größenordnung: („potential of removing up to 310 gigatons of CO₂ by 2100“); vgl. dazu: *Climeworks* (2025, Capture).

⁷¹² Vgl. dazu überblickartig: Umweltbundesamt (2024, Lösungen): „Die größten Potenziale (...) können zudem nur erreicht werden, wenn der globale Temperaturanstieg auf ein Mindestmaß reduziert wird, da die globalen Ökosysteme ihre Klimaschutzwirkung einbüßen, je stärker der Klimawandel voranschreitet.“

⁷¹³ Vgl. in diesem Sinne auch: ARD (2025, Klima).

⁷¹⁴ Umweltbundesamt (2025, Geoengineering); (Hervorhebungen durch Verfasser).

Verstärkung von Klimaresilienz als Kernaufgabe

Die Problematik des globalen Klimawandels ist seit einigen Jahrzehnten in der Öffentlichkeit bekannt; in Deutschland war dieses Thema sogar maßgeblich für die Gründung der Partei „Die Grünen“ im Jahr 1980. Trotz dieses langen Vorlaufs, der „eigentlich“ viel Zeit für sinnvolle Anpassungsmaßnahmen geboten hätte, ist nach allgemeiner Einschätzung bislang **zu wenig passiert**, um die Ziele des *Pariser Klimaabkommens* fristgerecht und zuverlässig zu erreichen.

- ▶ Dieser – durchaus deprimierende – Befund findet seinen Niederschlag regelmäßig in den laufenden *Sachstandsberichten des Weltklimarats (IPCC Reports)*.⁷¹⁵

In einer politökonomischen Analyse gehen die beiden Wirtschaftswissenschaftler *Reiner Eichenberger* und *David Stadelmann* (2025) den Ursachen dieser Versäumnisse nach. Sie beklagen, dass „... trotz der Alarmstimmung und den mittlerweile immer deutlicher wahrnehmbaren Kosten der Klimapolitik sowohl die globalen Treibhausgasemissionen als auch die Durchschnittstemperaturen (weiter) steigen.“⁷¹⁶

Die Gründe dafür liegen nach Ansicht der Autoren vor allem in **typischen Entscheidungs- und Handlungsmechanismen der politischen Ökonomie**, die schnelles Handeln nicht immer belohnen:

- ▶ „Denn die Reduktion von CO₂- und anderen Treibhausgasemissionen bringt unmittelbar Kosten, während die Nutzen erst in ferner Zukunft anfallen und ungewiss sind. Politik und Gesellschaft hingegen haben es lieber, wenn der **Nutzen lange vor den Kosten** anfällt.“⁷¹⁷

Aus dieser (zweifellos zutreffenden) Diagnose lässt sich folgern, dass sich damit zuletzt nicht nur der Schwerpunkt der Klimadebatte deutlich verlagert hat, sondern zwangsläufig auch die **möglichen Handlungsoptionen** zur Abwehr einer drohenden Klimakrise **massiv verengt** wurden.

Dies führt bei vielen politischen Entscheidungsträgern inzwischen zu einer sehr nüchternen Abwägung: Zunehmend „... scheint sich die **grundlegende ökonomische Logik** durchzusetzen: Echter Klimaschutz erfordert **effektives globales Handeln** – das aber kaum zustande kommt.“⁷¹⁸

Daraus resultiert im politischen Raum eine klare – und zugleich defaitistische – Schlussfolgerung:

- ▶ „Da effektiver globaler Klimaschutz kaum mehr realistisch wirkt, gewinnt **Anpassung an den Klimawandel** zunehmend an Bedeutung.“⁷¹⁹

Auch wenn sich die Sinnhaftigkeit dieser These mit guten Argumenten bestreiten lässt, gibt sie dennoch das **aktuelle politökonomische Kalkül** in vielen der Länder wieder, die sich öffentlich noch stark im Kampf gegen den globalen Klimawandel engagieren – darunter große Teile der EU.

Dieser Punkt ist von sehr grundsätzlicher Bedeutung, denn: Sobald eine Mehrzahl der finanzstarken Länder diese Einschätzung teilt (die USA haben sich hier bereits sehr klar positioniert!), ist damit zu rechnen, dass immer mehr finanzielle Ressourcen „kurzsichtig-pragmatisch“ umgelenkt werden – weg von „sinnvollen“ (langfristig wirksamen) Strategien zur Reduktion klimaschädlicher Emissionen und hin zu „notwendigen“ (kurzfristig unvermeidlichen) Ausgaben für eine **Anpassung** an den unausweichlichen Klimawandel.⁷²⁰

⁷¹⁵ Vgl. dazu die regelmäßigen Publikationen des *Weltklimarats (IPCC)* unter: IPCC (2025, Reports).

⁷¹⁶ *Reiner Eichenberger*, Professor für Theorie der Wirtschafts- und Finanzpolitik an der *Universität Freiburg i. Ü.*; *David Stadelmann* ist Professor für Volkswirtschaftslehre an der *Universität Bayreuth*; zitiert nach: NZZ (2025, Klimawandel).

⁷¹⁷ Eichenberger/Stadelmann (2025, Debatte); zitiert nach: NZZ (2025, Klimawandel); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁷¹⁸ Eichenberger/Stadelmann (2025, Debatte); zitiert nach: NZZ (2025, Klimawandel); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁷¹⁹ Eichenberger/Stadelmann (2025, Debatte); zitiert nach: NZZ (2025, Klimawandel); (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁷²⁰ Vgl. in diesem Sinne auch: Bardouille/Mohieldin (2025, Klimaresilienz): „Klima- und Naturkatastrophen sind heute wirtschaftliche Realität und keine entfernte Bedrohung mehr. Die Stärkung der Resilienz gegenüber diesen Schocks wird in den kommenden Jahren die Grundlage für nachhaltige Entwicklung und fiskalische Stabilität bilden.“



Klimaresilienz ist eine strategische Investition.

Bardouille/Mohieldin (2025, Klimaresilienz)



Selbst wenn derartige Kalküle eher „politisch-taktischer“ als „ernsthaft-strategischer“ Natur sind, erfüllen sie dennoch eine sehr wichtige Zielsetzung: Denn in allen vom Klimawandel direkt betroffenen Ländern (eine progressive Tautologie) sind **massive Anstrengungen zur Erhöhung der Klimaresilienz** erforderlich und letztlich unvermeidlich.⁷²¹

Diese Ansätze betreffen sehr unterschiedliche Bereiche, wie nachfolgend überblickartig skizziert:

- Schutz gefährdeter **Küstengebiete** vor steigendem Meeresspiegel
- Absicherung wichtiger **Infrastruktur** gegen Überflutung und Extremwetter
- Aufbau eines **resilienten Energiesystems** mit geringer Klimaabhängigkeit
- Sicherstellung eines dauerhaft flexiblen und **resilienten Nahrungsmittelsystems**
- Laufende Überprüfung und Anpassung gefährdeter **Versorgungs- und Lieferketten**

- Massiver Ausbau von **Katastrophenschutz** und **medizinischen Versorgungskapazitäten**
- Gezielte **Abkühlung von Städten** durch Begrünung und andere Maßnahmen
- **Abschirmung des Kredit- und Bankensystems** gegen Kumulation „*physischer Risiken*“
- Entwicklung **staatlicher oder kollektiver Lösungen** gegen das Problem der „*Uninsurability*“

Die genannten Aspekte erfordern ohne Zweifel einen hohen Planungs- und Koordinationsaufwand, große politische Verantwortung und enorme Klarsicht sowie – zwangsläufig – auch sehr **hohe finanzielle Ressourcen**. Dennoch dürften die anfallenden „**Resilienzkosten**“ in der Mehrzahl der Fälle grundsätzlich noch tragbar sein – zumindest für relativ leistungsfähige Länder.⁷²²

- ▶ Insofern führt an einer solchen „**Resilienzertüchtigung**“, im Sinne einer gezielten und frühzeitigen Anpassung an künftig stark veränderte klimatische Bedingungen, grundsätzlich kein Weg vorbei.⁷²³
- ▶ Parallel dazu sollte gezielt in die **Erforschung und den Ausbau geeigneter Frühwarnsysteme** für das Näherücken kritischer *Climate Tipping Points* investiert werden.⁷²⁴ (Ansatzpunkte dafür bieten unter anderem interdisziplinäre Gemeinschaftsprojekte wie das „*Tipping Points Modelling Intercomparison Project*“ (TIPMIP) oder das engmaschige Monitoring wichtiger Kippdynamiken aus dem Weltraum).⁷²⁵

⁷²¹ Vgl. dazu: Bardouille/Mohieldin (2025, Klimaresilienz). Analog auch bereits der Erdsystemforscher Nico Wunderling (2025), vgl. dazu: oben, Kap. 3.2.3 (Expertenbeitrag); auch zitiert unter: Wunderling (2025, Kippunkte).

⁷²² In diesem Sinne etwa: Eichenberger/Stadelmann (2025, Debatte); aussagefähige Berechnungen dazu sind jedoch naturgemäß kaum möglich. Vgl. dazu aber die fundierte Ausarbeitung von: WEF (2024, Inaction). Vgl. dazu auch: Bardouille/Mohieldin (2025, Klimaresilienz): „*Die Berücksichtigung von Klimaresilienz in der makroökonomischen Planung sollte das Wachstumspotenzial eines Landes stärken und nicht schwächen.*“

⁷²³ In diesem Sinne auch: University of Oxford, Global Tipping Points (2023, Report), S. 224-277.

⁷²⁴ Vgl. dazu explizit auch: University of Oxford, Global Tipping Points (2023, Report), S. 155-163.

⁷²⁵ Vgl. dazu: TIPMIP (2025, TIPMIP); Winkelmann et al. (2025, TIPMIP); sowie: Loriani et al. (2025, Monitoring). Die Notwendigkeit zum Aufbau zielgerichteter Frühwarnsysteme betont auch: Wunderling (2025, Kippunkte); Expertenbeitrag, oben, Kap. 3.2.3.

Zwei Aspekte dabei sind allerdings problematisch:

- ▶ Einerseits bleiben **ärmere Länder**, die oftmals auch rein geographisch stärker vom globalen Klimawandel betroffen sind, tendenziell zurück, wenn die globale Gemeinschaft keine ausreichende Unterstützung gibt.⁷²⁶
- ▶ Andererseits wäre eine Politik, die weder das Ziel einer Einhaltung des 1,5°C-Ziels ernsthaft verfolgt, noch frühzeitig **in eigene systemische Klimaresilienz investiert**, sehr bald zum Scheitern verurteilt und könnte damit extreme gesellschaftliche Spannungen auslösen.⁷²⁷

Abschließend lässt sich dazu feststellen:

Im Regime einer rapide voranschreitenden Erderwärmung gibt es offenkundig **nur einen guten „Plan A“ – massive Reduktion von Treibhausgasemissionen!** Dagegen scheint ein vernünftiger und für das Erdklima ebenfalls verträglicher „Plan B“ derzeit nicht zu existieren.⁷²⁸ Alle derzeit diskutierten Möglichkeiten, etwa durch massiven Einsatz neuer Technologien dem drohenden Klimawandel noch „irgendwie“ ein Schnippchen schlagen zu können („Plan C“), erscheinen derzeit hochspekulativ, riskant oder verfügen bislang nur über sehr geringe Wirkungsgrade.⁷²⁹

Damit bleibt im Wettlauf gegen die unerbittliche Macht der *Climate Tipping Points* derzeit wohl nur ein erfolversprechender Weg, der aber aus **drei Bausteinen** besteht:

- Maximale **Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen**
- Parallel dazu: Gezielter **Aufbau klimaresilienter Systeme und Gesellschaften**
- Perspektivisch: Sicherstellung von **Ressourcen zur Bewältigung negativer Klimafolgen**

Nur wenn alle drei Teilstrategien möglichst synchron und global koordiniert verfolgt werden, können aus heutiger Sicht die schlimmeren der (durchaus plausiblen) „Worst Case“-Szenarien vermieden werden. Ob der Einsatz neuer Technologien, wie etwa *Direct Air Capture* oder *Climate Engineering*, dabei jemals eine wichtige Rolle spielen wird, ist aus heutiger Sicht zumindest umstritten – und vielfach eher unwahrscheinlich.

„Hope when the water rises
you built a wall“

„I lived“, Lyrics, OneRepublic, 2013

⁷²⁶ Dieser Aspekt spielte bei der letzten Weltklimakonferenz *COP-29* in *Baku* bereits eine sehr zentrale – und leider unrühmliche – Rolle; vgl. dazu überblickartig: Tagesschau (2024, Scheitern); Umweltbundesamt (2024, COP 29).

⁷²⁷ Aus heutiger Sicht folgen insbesondere die USA – präziser: die aktuelle US-Regierung – genau diesem Weg. Vgl. zu diesbezüglichen Szenarien auch ausführlich den *Global Tipping Points Report*; unter: University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report).

⁷²⁸ So zumindest auch die Einschätzung von WWF (2024, Planet): „Es gibt keinen Plan B.“

⁷²⁹ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, vorhergehende Abschnitte; sowie: Zeit (2025, Riskant).

7 FAZIT UND AUSBLICK

Wie die vorliegende Analyse klar gezeigt hat, befindet sich das *Erdsystem* – und damit auch das globale Klima – auf direktem Weg in eine sehr ungewisse Zukunft. Auslöser dieser Dynamik ist das vom Menschen verursachte Phänomen **progressiver Erderwärmung**, das wiederum aus dem massiven Ausstoß sogenannter Treibhausgase resultiert. Beides ist unmittelbare Folge der seit rund 150 Jahren rapide fortschreitenden Industrialisierung – weitgehend basierend auf der Verbrennung **kohlenstoffbasierter Energieträger** wie Erdöl und Erdgas. Soweit die hinlänglich bekannten Fakten.⁷³⁰



Der Klimawandel ist menschengemacht, daran gibt es keinerlei Zweifel mehr.

World Ocean Review (2024, Klimakrise)



Weniger bekannt – oder bereits hinreichend verstanden – ist dagegen bislang das **Prinzip der kritischen Kippunkte** im globalen Klimasystem und im gesamten Erdsystem, also der **Climate Tipping Points**.

Derartige Kippunkte sind sowohl Auslöser als auch Ergebnis komplexer Dynamiken und verschiedenartiger **nichtlinearer Prozesse** in wichtigen Teilsystemen des globalen Klimas – den sogenannten **Klima-Kippelementen**:

- ▶ Zu diesen zählen insbesondere die **Eisschilde** in Grönland und der Antarktis, die **Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC)**, der **Amazonas-Regenwald** sowie andere – teilweise nachgelagerte oder nur regional wirksame – Kippdynamiken.⁷³¹

Als Folge inhärenter **Selbstverstärkungs- und Rückkopplungsprozesse** können diese Kippelemente bei Annäherung an kritische Schwellenwerte – die wiederum direkt von spezifischen Niveaus der Erderwärmung abhängig sind – relativ abrupt ihren jeweiligen **Kippunkt** erreichen. Sobald dieser ausgelöst und überschritten wurde, verändert das jeweilige Kippelement eigendynamisch – und **grundsätzlich irreversibel!** – seinen vorherigen Systemzustand.⁷³²

- ▶ Wenn ein solches Klimatelement „umkippt“, tritt ein selbstverstärkender Prozess ein, der sich durch **positive Rückkopplungen** selbständig weiter fortsetzt und beschleunigt.
- ▶ Ein vorher relativ stabiles System verwandelt sich so nach Überschreiten seines Kippunkts in ein **instabiles System** und entwickelt eine **Dynamik stetig negativer Progression und/oder Eskalation**.⁷³³ (Vgl. dazu die schematische Darstellung in Abb. 81).



This means that, at the tipping point, a small shift in the background climate can trigger a large-scale qualitative system change.

Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades)



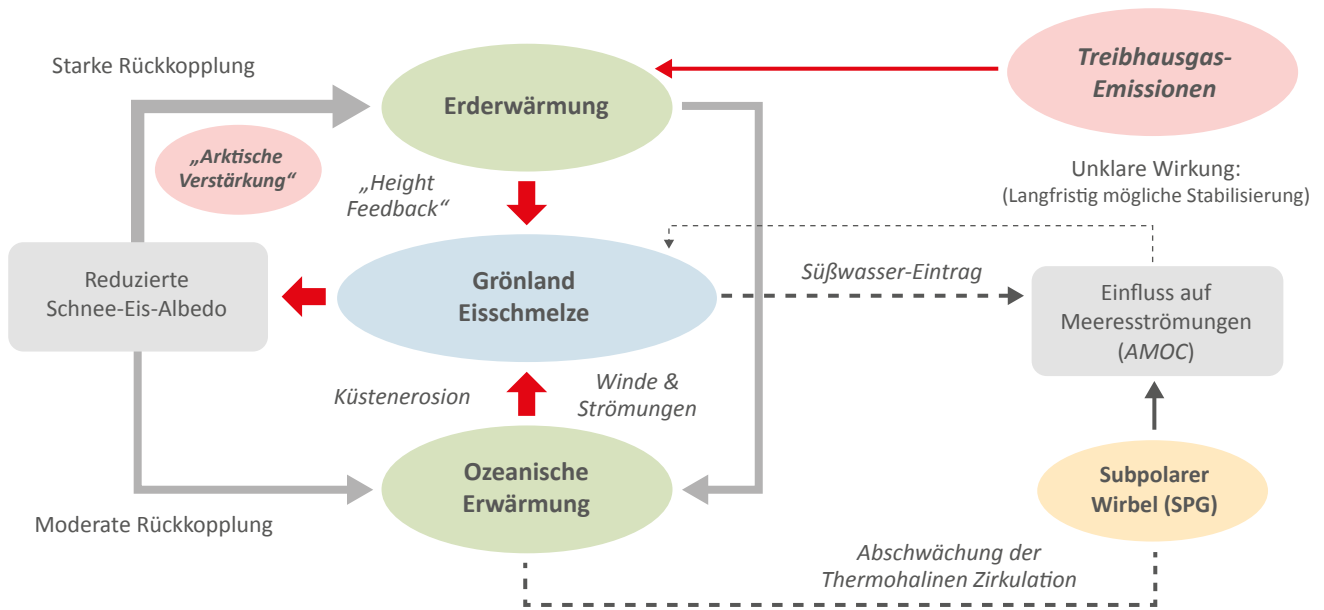
⁷³⁰ Vgl. dazu einführend und ausführlich bereits: oben, Kap. 2-3.

⁷³¹ Vgl. dazu grundlegend bereits: oben, Kap. 3.2; sowie ausführlich Kap. 4-5.

⁷³² Vgl. dazu ausführlich und mit weiteren Nachweisen bereits: oben, Kap. 3-4.

⁷³³ Vgl. dazu ausführlich und mit weiteren Nachweisen bereits: oben, Kap. 4.

Abb. 81: Kippdynamik und Rückkopplungen am Beispiel des Grönland-Eisschildes



Quelle: FERI Cognitive Finance Institute, 2025, eigene Darstellung

Für „umgekippte“ Klimatelemente beginnt damit ein Prozess der **anhaltenden Selbstschädigung** (oder Selbstzerstörung) – ganz im Sinne einer „**Abwärtsspirale**“ oder eines „**Teufelskreises**“. Bisherige stabilisierende Wirkungen des jeweiligen Kippelements innerhalb des globalen Klimasystems werden dadurch weitgehend geschwächt, aufgehoben oder sogar ins Gegenteil verkehrt:

- ▶ Ein Gletscher in Grönland oder ein Eispanser in der Antarktis, der erst einmal abgeschmolzen ist, kann für den globalen Wasserkreislauf oder die Reflektion von Sonneneinstrahlung zukünftig keine positive Rolle mehr spielen – aber das Gesamtsystem weiter belasten!

Hinzu kommt jedoch noch ein weiterer **überaus wichtiger Punkt**: Auch völlig unterschiedliche und weit entfernte Klimakippelemente zeigen ein hohes Maß an **systemischer Interaktion** und können sich gegenseitig stark beeinflussen. So kann das „Umkippen“ eines Kippelements am Nordpol unmittelbar auf die Kippdynamik des Amazonas-Regenwaldes in den Subtropen oder anderer wichtiger Elemente des

Erdsystems – wie etwa der *Atlantischen Umlaufzirkulation (AMOC)* – **einwirken** und diese dadurch erst in Gang setzen, **verstärken oder progressiv beschleunigen**.⁷³⁴

Diesen Zusammenhang einer **wechselseitigen Interdependenz unterschiedlicher Klimakippelemente** – und möglicher *Climate Tipping Points* – verdeutlicht die grundlegende Darstellung in Abb. 82, S. 176.

Mit anderen Worten:

Aus der Dynamik der Klimakippunkte können – durch Kombination und Interaktion verschiedenartiger Klimakippelemente – regelrechte „**Dominoeffekte**“ entstehen, also eine Überlagerung, Verstärkung und nichtlineare Kumulation sowie ein „Aufschaukeln“ bis hin zu sogenannten „**Kippkaskaden**“:

- ▶ „**Some climate tipping systems closely interact, and most interactions tend towards destabilising, making tipping ‚cascades‘ possible.**“⁷³⁵

⁷³⁴ Vgl. dazu ausführlich und mit weiteren Nachweisen bereits: oben, Kap. 4 (insbesondere Kap. 4.4-4.5).

⁷³⁵ University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report), S. 51; (Hervorhebungen durch Verfasser). Vgl. dazu ausführlich und mit weiteren Nachweisen bereits: oben, Kap. 4 (insbesondere Kap. 4.3-4.5).

Abb. 82: Multiple Interdependenzen von Climate Tipping Points



Verbindungslinien kennzeichnen mögliche Rückkopplungsprozesse

Quelle: RAOnline (2025, Report); Anlehnung an Darstellung von PIK (2018); (Temperaturdaten teilweise überholt)

“
 ... es können Dominoeffekte
 geschehen, die von der Menschheit
 nicht beherrschbar sind.
 ”

Nico Wunderling, Klimaforscher, 2025

Der Klimawissenschaftler Nico Wunderling (2025), Professor am Center for Critical Computational Studies (C³S) an der Goethe-Universität Frankfurt, erklärt das entsprechende Grundproblem:

- ▶ „Wenn der Eisschild Grönlands schmilzt, und dann die Atlantische Meridionale Umwälzströmung (AMOC), von dem der Golfstrom ein Teil ist, sich abschwächt und anschließend der Hotspot der Artenvielfalt, der Amazonas-Regenwald, versteppt, dann ist unser Planet nicht mehr stabil“
- ▶ „All das steht miteinander in Verbindung und es können Dominoeffekte geschehen, die von der Menschheit nicht beherrschbar sind.“⁷³⁶

Der entscheidende Aspekt dabei:

- ▶ Das **Auslösen global verknüpfter und sich gegenseitig verstärkender Kippkaskaden** würde aus Sicht der modernen Klimaforschung **weitaus größere und akutere Klimarisiken** hervorrufen, als bislang in vielen (eher linear aufgebauten) Klimamodellen und Prognosen unterstellt!

Insbesondere dieser Punkt ist von **größter Bedeutung** für den weiteren Verlauf der gesamten Klimawandel-Diskussion – aber auch für das richtige und konsequente Handeln in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft: Dies gilt sowohl im Sinne größtmöglicher **Reduktion von Treibhausgasemissionen** als auch beim Aufbau resilienter Strukturen und Prozesse – also bei der gezielten **Erhöhung der gesamtgesellschaftlichen Klimaresilienz**.⁷³⁷

⁷³⁶ Wunderling (2025, Kippelementen); (Hervorhebungen und kleine redaktionelle Korrekturen durch Verfasser).

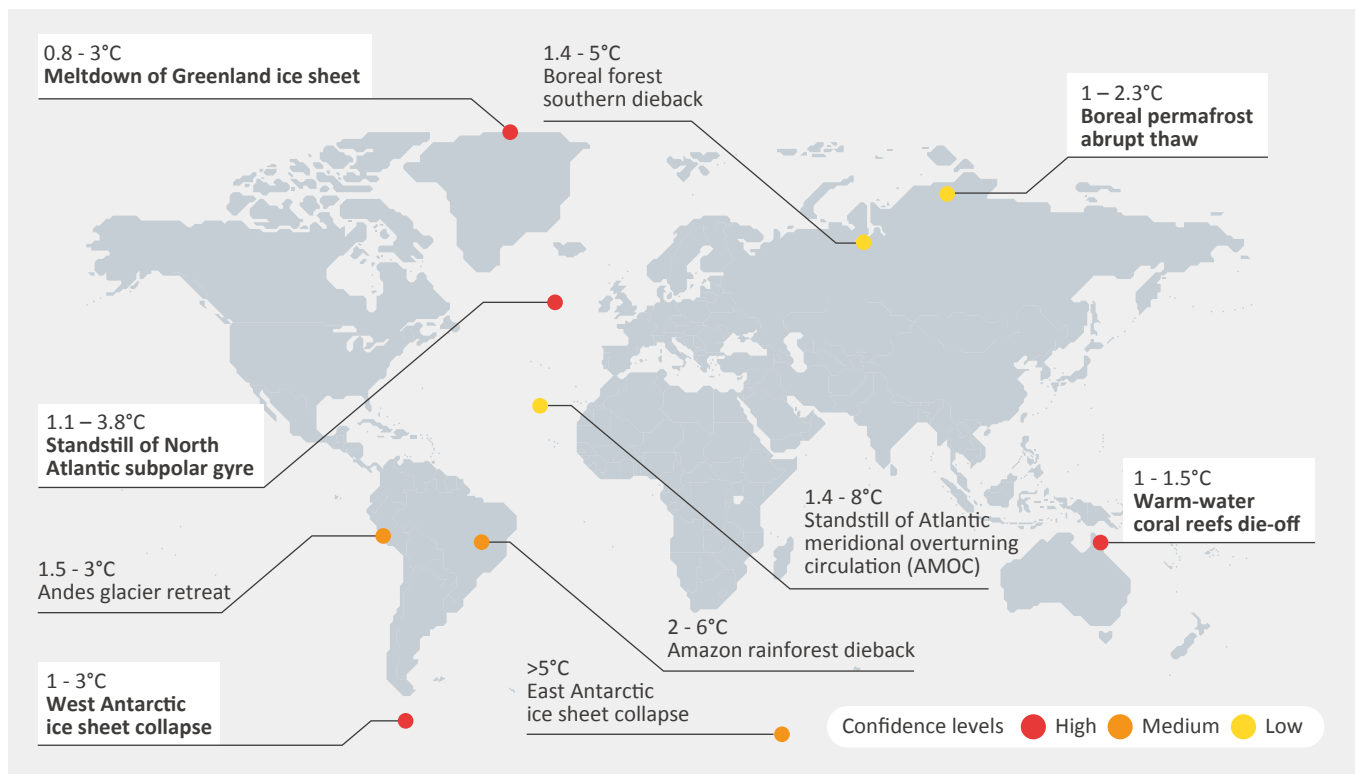
⁷³⁷ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 6.

Wie sich heute zeigt, sind aus Perspektive einiger *Climate Tipping Points* bereits Niveaus der Erderwärmung von **1,5-2°C** als kritisch einzuschätzen – gefährlich nahe an den *Pariser Klimazielen*. Im Einzelfall – wie bei den *Südsee-Korallenriffen*, bei den *Eisschilden in Grönland* und der *Westantarktis* sowie beim *Subpolaren Wirbel* im Nordatlantik – könnten die kritischen Kippunkte aber auch bereits **deutlich unterhalb dieser Werte** liegen (bei rund **0,8-1,5°C**).⁷³⁸ (Vgl. dazu Abb. 83).

“
Der Mensch allein verantwortet
den Klimawandel und seine Folgen.

World Ocean Review (2024, Klimakrise)

Abb. 83: Die wichtigsten Climate Tipping Points und ihre kritischen Temperaturgrenzen



Quelle: WEF (2024, Inaction); Daten von Global Tipping Points Report (2023) sowie Boston Consulting Group

“
The core tipping elements with the lowest thresholds are
the large ice sheets on Greenland and West Antarctica.

Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades)

⁷³⁸ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 5; insbesondere die Darstellung in Tab. 2 (in Kap. 6.1).

Folglich sind mit einiger Wahrscheinlichkeit wichtige Kippdynamiken des Erdsystems **bereits aktiviert** und werden sich (bei weiter fortschreitender Erderwärmung) nicht nur weiter fortsetzen, sondern auch auf andere Kippelemente und deren Kippdynamiken verstärkend und beschleunigend einwirken – ganz im Sinne der **systemisch vernetzten Interaktion** wichtiger *Climate Tipping Points*.⁷³⁹ Der *Global Tipping Points Report* (2023) bestätigt diese Einschätzung explizit:

- ▶ „**Some Earth system tipping points could be very close already.**“⁷⁴⁰

Die enorme Bedeutung der Kippdynamiken im Erdklima wurde erst vor wenigen Jahren von der Klimaforschung gezielt adressiert und erforscht. Das entsprechende Wissen ist deshalb noch relativ neu und hat noch nicht überall Eingang in klimapolitische Diskurse und Abstimmungsprozesse gefunden. Dieses **Erkenntnisdefizit** ändert sich derzeit jedoch relativ schnell – sowohl durch zunehmende Konzentration der Klimaforschung auf die grundlegende Physik und „*Thermodynamik*“ der *Climate Tipping Points*, aber auch durch laufende Aktualisierung und verstärkte Kommunikation entsprechender Forschungsergebnisse.⁷⁴¹

Dennoch besteht aktuell noch ein sehr wichtiges **Grundproblem**, denn: Viele der bislang üblichen Modelle, Prognosen und Simulationsrechnungen zum Klimawandel leiden unter einem **entscheidenden Defizit**:

- ▶ Die Mehrzahl dieser Verfahren basiert nicht auf einem umfassenden und **systemdynamischen Ansatz**, der explizit auch **kumulative und progressive Effekte** aus der Überlagerung und gegenseitigen Verstärkung **mehrerer Kippdynamiken** berücksichtigt!

Dieser Punkt dürfte verantwortlich sein für ein regelmäßig wiederkehrendes Problem vieler Klimamodelle und entsprechender Prognosen: Immer wieder zeigt sich darin das Bild einer **deutlichen Unterschätzung**, denn Ausmaß, Tempo und Dynamik wichtiger Klimaveränderungen werden dort oftmals deutlich – und offenbar „*systematisch*“ – von der späteren Realität überholt.

- ▶ Dieses Phänomen einer **systematischen Unterschätzung** des Klimawandels ist gefährlich, denn es führt zu **falschen klimapolitischen Schlussfolgerungen** sowie einer deutlich **verzögerten Reaktionsfunktion**.⁷⁴²

Wie im Rahmen der vorliegenden Analyse gezeigt wurde, liegt dieses Versäumnis – zumindest teilweise – auch an der mangelnden Verfügbarkeit hinreichend komplexer Modelle des Erdsystems, die jedoch nur von extrem performanten Hochleistungscomputern überhaupt durchgerechnet werden können. Diesen Punkt konzediert auch der Klimaforscher *Nico Wunderling* (2025):

- ▶ „*Die komplexesten Modelle in der Forschung, die wir derzeit haben, werden gerade erst entwickelt, um Klimakippunkte simulieren zu können.*“⁷⁴³

Grundsätzlich gibt es auch hier zumindest tendenzielle Fortschritte, die wohl künftig zu deutlich **präziseren Einschätzungen der planetaren Kippdynamiken** führen werden.⁷⁴⁴

⁷³⁹ Vgl. dazu grundlegend bereits: oben, Kap. 4; sowie die ausführlichen Detailanalysen in Kap. 5.

⁷⁴⁰ University of Exeter, *Global Tipping Points* (2023, Report), S. 51; (Hervorhebung durch Verfasser).

⁷⁴¹ Hierunter fallen insbesondere die Anstrengungen der Klimawissenschaftler rund um die *University of Exeter* (und darüber hinaus), die für die Erstellung der regelmäßigen *Global Tipping Points Reports* verantwortlich sind; vgl. dazu die zahlreichen Referenzen und Verweise im Rahmen der vorliegenden Publikation.

⁷⁴² Vgl. dazu die zahlreichen Nachweise im Rahmen der vorliegenden Analyse, die eine (oftmals sehr deutliche) „*Unterschätzung*“ wichtiger klimatischer Veränderungen konzedieren. Oftmals dürfte dieses Problem auf eine unzureichende Berücksichtigung komplexer Interaktionen und selbstverstärkender Rückkopplungseffekte zwischen zentralen Klima-Kippelementen zurückzuführen sein.

⁷⁴³ Wunderling (2025, Kippelementen).

⁷⁴⁴ Diesen Punkt bestätigt der Klimaforscher *Nico Wunderling* vom *Center for Critical Computational Studies (C²S)* an der *Goethe-Universität Frankfurt*: „*Dann sind wir in der Lage, einzelne Interaktionen so zu quantifizieren, dass wir wissen, ob sie stabilisierend oder destabilisierend sind. Wenn es gut läuft, wissen wir zudem, wie stark die Interaktionen sind und können das Expertenwissen durch echte Erdbeobachtungsdaten erweitern und teilweise auch ersetzen.*“; vgl. Wunderling (2025, Kippelementen).

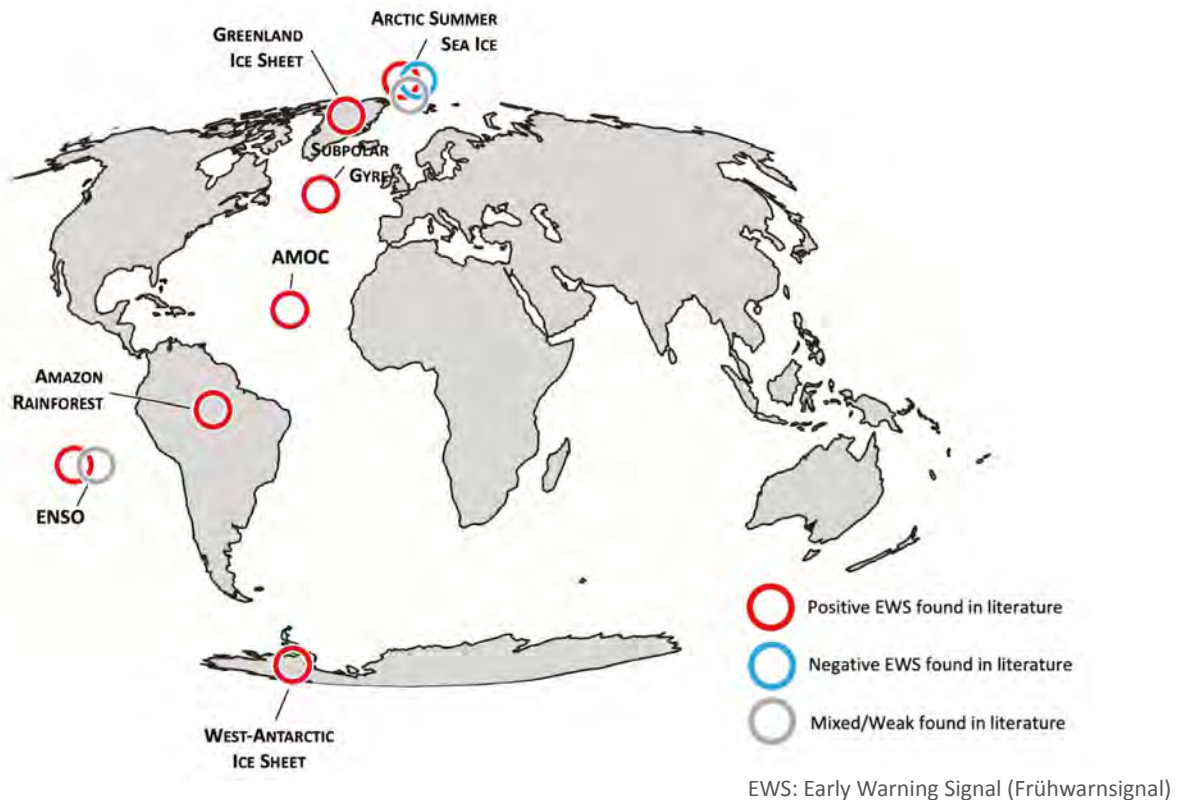
Komplexere Klimamodelle bieten somit die Möglichkeit, Grundeigenschaften und Interdependenzen einzelner Kipp-elemente, Kippunkte und Kippdynamiken wesentlich besser zu erforschen als bislang. Gleichzeitig muss sich die Klima-forschung verstärkt auf eine gezielte Überwachung („Monitoring“) **charakteristischer Frühwarnsignale** („Fingerprints“) konzentrieren, die ein mögliches Auslösen kritischer Kipp-punkte des Erdsystems mit hinreichendem Vorlauf ankündi-gen (vgl. dazu Abb. 84).

- **Beide Ansätze erlauben letztlich eine präzisere Einschätzung von Climate Tipping Points, möglichen Kippkaska-den sowie deren jeweiliger systemischer Kritikalität.**⁷⁴⁵

Allerdings dürften sich als Ergebnis dieser Forschun-gen bisherige Annahmen und Szenarien sowie gängige (politische) Arbeitshypothesen zum Ablauf und den möglichen Folgen des Klimawandels nochmals **spür-bar verschärfen**. Mit anderen Worten:

- Der **Handlungsdruck** auf Politik, Wirtschaft und Gesellschaft für ein besseres „Management“ der (offenkundig) näher rückenden Klimakrise wird zeitnah **weiter ansteigen**.⁷⁴⁶

Abb. 84: Die wichtigsten Frühwarnsignale bei Climate Tipping Points



Quelle: University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report); Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades)

⁷⁴⁵ Vgl. zu diesem Begriff und seiner grundsätzlichen Bedeutung bereits ausführlich: oben, Kap. 3.2.1; 4.2; sowie 5.1 (dort insbesondere auch Abb. 19).

⁷⁴⁶ Vgl. dazu ausführlich: oben, Kap. 6 (insbesondere 6.5).



Some Earth system tipping points could be very close already.

Global Tipping Points (2023, Report)



Obwohl dieser Handlungsdruck in vielen Bereichen des planetaren Klimas zunehmend erkennbar und „greifbar“ ist, fehlt es noch immer an wirksamen, konsequenten und global koordinierten Maßnahmenpaketen. Die zunehmend ritualisierten **Weltklimakonferenzen (COP)** verlieren zuletzt deutlich an Entschlusskraft – und werden immer stärker von den Partikularinteressen großer Wirtschaftsmächte (USA und China) und wichtiger Erdölproduzenten (Golfstaaten) bestimmt.⁷⁴⁷

- Dadurch gehen der Menschheit wichtige Zeit und Handlungsfähigkeit verloren, um eine absehbare Klimakrise noch abmildern und vor allem den latent drohenden Übergang in ein „**Hothouse-Szenario**“, also eine Welt nach Erwärmung um mindestens **3-4°C** mit hinreichender Verlässlichkeit verhindern zu können.⁷⁴⁸

Um eine derartige **Eskalation des Klimawandels** – die aus Sicht der *Climate Tipping Points*-Forschung deutlich wahrscheinlicher ist als bislang oft unterstellt! – noch „in letzter Sekunde“ verhindern zu können, muss der weitere Ausstoß von Treibhausgasen massiv und dauerhaft reduziert werden. Dennoch ist aus heutiger Sicht ein **temporäres Überschießen** der Erderwärmung über die kritischen Schwellenwerte von 1,5-2°C hinaus bereits so gut wie sicher – und dürfte schon in Kürze eintreten.⁷⁴⁹

- Dieses Szenario – auch als „**Overshooting**“ bekannt – würde parallel eine enorme **Netto-Entnahme von CO₂** aus der Atmosphäre erforderlich machen, um die planetarische Wärmebilanz in einer noch vertretbaren Balance zu halten.

⁷⁴⁷ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 6 (insbesondere 6.2; sowie 6.4-6.6).

⁷⁴⁸ Zum Begriff sowie den möglichen Eigenschaften und Risiken eines *Hothouse-Szenarios* vgl. ausführlich bereits: oben, Kap. 6.3-6.4; sowie 6.6.

⁷⁴⁹ Vgl. dazu die entsprechenden Bewertungen von: IPCC (2023, Report); University of Exeter, Global Tipping Points (2023, Report) & (2025, Report); sowie: WMO (2025, Climate).

⁷⁵⁰ Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 6.6 – mit den Stichworten *CDR*, *CCS*, *DAC* und *SRM*.

⁷⁵¹ Vgl. dazu bereits: oben, Kap. 6.5-6.6.

⁷⁵² Vgl. dazu ausführlich bereits: oben, Kap. 2; 3.2.1; 6.2; sowie 6.4.

Sowohl die gesellschaftlich-politischen als auch die technischen Anforderungen an eine solche „**Netto-Negativ-Emission**“ von Treibhausgasen sind aus heutiger Sicht extrem hoch und bieten bislang – trotz einzelner interessanter Ansätze – in keiner Weise den erforderlichen Wirkungsgrad.

Ob sich dieser Befund noch durch bahnbrechende **technologische Innovationen** ändern lässt, oder ob künftig spezielle „**Geoengineering**“-Verfahren zum Einsatz kommen werden (mit einer Vielzahl bedenklicher Nebenwirkungen und Langfristfolgen), ist derzeit noch völlig unklar.⁷⁵⁰

- Für eine Abwehr möglicherweise katastrophaler Klimaszenarien führt folglich an einer **massiven Reduktion von Treibhausgasemissionen** kein Weg vorbei!

Gleichzeitig sollten in Wirtschaft, Gesellschaft und (vor allem) Energiepolitik auch gezielt **positive Kipodynamiken** mit starken Trends initiiert werden, um möglichst schnell, wirksam und sozialverträglich eine Zukunft mit „moderaten“ Emissions- und Erwärmungspfaden zu realisieren.

- Das exponentielle Wachstum **erneuerbarer Energien** sowie (in Teilen) auch der **Elektromobilität** sind dafür bereits wichtige Ansatzpunkte.⁷⁵¹

Diese Erkenntnis ist derzeit jedoch noch nicht überall in gleicher Weise im gesellschaftlichen, politischen oder wirtschaftlichen „*Mindset*“ verankert. Ganz im Gegenteil: Viele politische Strömungen, nicht zuletzt in den USA, propagieren derzeit eine **Abkehr von gesichertem Faktenwissen** zur fortschreitenden Dynamik der Erderwärmung.⁷⁵²

Dieses grundlegende **Wahrnehmungs- und Erkenntnisdefizit** überträgt sich auch in die Sphäre der Wirtschafts- und Kapitalmarktmodelle: Dort wird das **Problem der Climate Tipping Points** – als Quelle massiver wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Disruption sowie daraus resultierender systemischer Risiken – bislang noch weitgehend ausgeblendet oder nahezu vollständig ignoriert.

Dieses Versäumnis beklagt auch OECD (2022):

- „... existing [economic] estimates **still overlook some tipping point impacts and possible interactions and are thus likely still too optimistic.**“⁷⁵³

Dieser Befund ist aus Sicht des *FERI Cognitive Finance Institute* ein weiteres **plakatives Beispiel** für die verbreitete Tendenz von Wirtschaftsakteuren und Kapitalmarktteilnehmern, wichtige Ereignisse (oder Risiken) in der Zukunft zu ignorieren oder auszublenden, sofern das zugrundeliegende Thema als „zu komplex“ oder „noch nicht relevant“ empfunden wird (▷ „**Blind Spot**“-Phänomen).

Diese **kognitive Anomalie** ist ein wichtiger Teil dessen, was durch den speziellen Forschungsansatz des *FERI Cognitive Finance Institute* gezielt überwunden werden soll.⁷⁵⁴ Erfahren Sie hier mehr über den Cognitive Finance Ansatz:



Im Gegensatz zur Mehrzahl der Akteure in Wirtschaft und Kapitalmärkten haben zuletzt jedoch wichtige Exponenten der Finanzaufsicht die Problematik der *Climate Tipping Points* erstmals deutlich wahrgenommen und zugleich höher priorisiert: Im Ergebnis führt dies zu einer spürbaren Ausweitung aufsichtsrechtlicher **Anforderungen und Regulierungen**, wodurch das Gefahrenpotential von „*physischen Risiken des Klimawandels*“ für Finanzsysteme verstärkt überwacht werden soll:

- Unter dem Stichwort „**Planetary Solvency**“ werden künftig **neue Metriken zur Risikofassung und -bewertung** entwickelt und angewendet. Ziel ist dabei, ein unkontrolliertes „*Durchschlagen*“ klimabedingter Risikokumulationen (explizit auch im Sinne der *Climate Tipping Points* sowie daraus resultierender **Risikokaskaden!**) auf Wirtschaftsprozesse, Finanzsysteme und Kapitalmärkte zu verhindern.⁷⁵⁵

Damit wird unmittelbar deutlich, worin die eigentliche Bedeutung der *Climate Tipping Points* speziell aus Sicht von Unternehmern, Vermögensinhabern, Investoren und Finanzmarktteilnehmern liegt. Neben einer direkten und individuellen Betroffenheit durch die Folgen der Erderwärmung geht es dabei **primär um folgende Aspekte:**

- Die stärkere (und explizite) Berücksichtigung von „**physischen Risiken des Klimawandels**“ auf Ebene der Finanzaufsicht und Kapitalmarktregulierung verändert das Umfeld für Finanzinvestoren in sehr zentralen Punkten.
- Künftig werden **materielle („physische“) Klimarisiken** sehr viel stärker bei der Beurteilung von Lieferketten, Bonitäten, Versicherungsschutz und anderen Aspekten herangezogen. Stichworte wie *Uninsurability* und *Protection Gap* rücken damit verstärkt ins Blickfeld – aber auch grundsätzliche Prüfkriterien zur „*physischen*“ **Klimaresilienz** von Unternehmen, Geschäftsmodellen und kapitalmarktrelevanten Körperschaften.⁷⁵⁶
- Vielen Unternehmen – selbstredend auch börsennotiert – dürfte diese Sichtweise noch **wenig vertraut** sein; mutmaßlich gilt dies auch für die Mehrzahl der Ökonomen, Finanzanalysten, Investoren und Kapitalmarktteilnehmer.
- Genau hier liegt künftig das Risiko einer **signifikanten Neubewertung (Repricing)** von Unternehmen, Unternehmensanteilen oder anderen Vermögenswerten – ausgelöst durch Anwendung neuer **Risikometriken** und **Risikomodelle**, die explizit am Prinzip der „*Planetary Solvency*“ ausgerichtet sind und konkrete Risiken des Klimawandels einbeziehen.⁷⁵⁷
- Zwangsläufig rücken damit auch die komplexen **Risikodynamiken** und **Risikodimensionen** der *Climate Tipping Points* verstärkt in den Fokus, die bislang in der Öffentlichkeit und an den Kapitalmärkten offenbar noch **stark unterschätzt** werden.⁷⁵⁸

⁷⁵³ OECD (2023, *Climate Tipping Points*), S. 43; (Hervorhebungen durch Verfasser).

⁷⁵⁴ Vgl. dazu ausführlich: *FERI Cognitive Finance Institute* (2025, *Cognitive*).

⁷⁵⁵ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 6 (speziell 6.3.)

⁷⁵⁶ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 6.3.

⁷⁵⁷ Vgl. dazu bereits ausführlich: oben, Kap. 6.1-6.3.

⁷⁵⁸ Diese Schlussfolgerung basiert auf den Gesamtergebnissen der vorliegenden Analyse.

Letztlich könnten dadurch künftig **spürbare Anpassungsreaktionen** ausgelöst werden, die sowohl an den Kapitalmärkten aber auch in Banken-, Versicherungs- und übergeordneten Finanzsystemen, deutliche Spuren hinterlassen würden. Ein vergleichbares „Repricing“ zuvor massiv unterschätzter (oder ignoriertes) Risiken des Klimawandels fand bereits vor rund zehn Jahren statt:

- ▶ Damals wurde an den Kapitalmärkten bei vielen Unternehmen die sogenannte „**Carbon Bubble**“ – hohe Zukunftswerte für nicht mehr kapitalisierbare CO₂-Budgets – sehr deutlich und oftmals vehement „ausgepreist“.⁷⁵⁹

Das FERI Cognitive Finance Institute hat die damalige Entwicklung frühzeitig erkannt und bereits 2017, zusammen mit dem Kooperationspartner WWF, im Rahmen einer umfassenden Studie analysiert sowie auf die entsprechenden Risiken hingewiesen.

Hier geht's zur Kurzversion der Studie „Carbon Bubble und Dekarbonisierung – Unterschätzte Risiken für Investoren und Vermögensinhaber“:



Abschließend ist festzustellen, dass die Menschheit durch den fortschreitenden Prozess der Erderwärmung schon in sehr naher Zukunft mit **bislang unbekannt globalen Risiken** konfrontiert sein wird. Noch wäre Zeit, die schlimmsten Risikorealisationen (wie etwa echte „*Klima-Kippkaskaden*“ und „*Hothouse-Szenarien*“) abzuwenden.

- ▶ Sowohl die **Bereitschaft** als auch die **Lösungskompetenz** zur Bewältigung dieser Menschheitsaufgabe scheinen derzeit jedoch der Größe des Problems noch nicht annähernd gerecht zu werden.

Damit geht die Menschheit in eine **ungewisse Klimazukunft**, deren einziger Trost darin zu liegen scheint, dass ihre zentralen Merkmale und Risiken bereits seit Jahrzehnten bekannt waren!

- ▶ Hilfreich wäre vielleicht ein radikaler Perspektivenwechsel, wie von *Albert Einstein* bereits vor rund 100 Jahren angeregt:



We cannot solve our problems with the same thinking we used when we created them.

Albert Einstein, zitiert nach: IFoA (2024, Scorpion)



„The concept of tipping points fundamentally alters our understanding of climate change ...“

University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report)

⁷⁵⁹ Vgl. dazu ausführlich: Kopp et al. (2017, Bubble).

Literaturverzeichnis

Bücher und Publikationen

- Abbott, B. W./Brown, M./Carey, J. C./Ernakovich, J./Frederick, J. M./Guo, L./Hugelius, G./Lee, R. M./Lorant, M. M./Macdonal, R./Mann, P. J./Natali, S. M./Olefeldt, D./Pearson, P./Rec, A./Robards, M./Salmon, V. G./Sara, S./Schädel, C./Schoor, E. A. G./Shakil, S./Shogren, A. J./Strauss, J./Tank, S. E./Thornton, B. F./Treharne, R./Turetsky, M./Voigt, C./Wright, N./Yang, Y./Zarnetske, J. P./Zhang, Q./Zolkos, S.** (2022, Permafrost): We Must Stop Fossil Fuel Emissions to Protect Permafrost Ecosystems, veröffentlicht 29.06.2022, <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.889428/full>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Abram, N. J./Purich, A./England, M. H./McCormack, F. S./Strugnelli, J. M./Bergstrom, D. M./Vance, T. R./Stål, T./Wienecke, B./Heil, P./Doddridge, E. W./Sallée, J.-B./Williams, T. J./Reading, A. M./Mackintosh, A./Reese, R./Winkelmann, R./Klose, A. K./Boyd, P. W./Chown, S. L./Robinson, S. A.** (2025, Antarctic): Emerging Evidence of Abrupt Changes in the Antarctic Environment, veröffentlicht 20.08.2025, <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09349-5>, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- AIMS** (2025, Reef): Great Barrier Reef – Annual Summary Report Coral Reef Condition 2024/2025, veröffentlicht 06.08.2025, https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2025-08/AIMS_LTMP_Report_GBR_coral_status_2024_2025_final_web.pdf, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- 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, Climate Tipping Points): Exceeding 1.5°C Global Warming Could Trigger Multiple Climate Tipping Points, veröffentlicht 09.09.2022, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn7950>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Arthur, W. B.** (2014, Complexity): Complexity and the Economy, Oxford University Press, New York, 2014.
- AWI** (2010, Perspektive): Die polare Perspektive, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, veröffentlicht 2010, https://www.eskp.de/fileadmin/eskp/publikationen/klimawandel/Die_polare_Perspektive.pdf, zuletzt abgerufen am 30.08.2025.
- Barrage, L./Nordhaus, W.** (2024, DICE-2023): Policies, Projections, and the Social Cost of Carbon: Results from the DICE-2023 Model, PNAS, veröffentlicht 19.03.2024, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2312030121>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- Bartenwerffer, T. von** (2020, Ressourcenverbrauch): Ressourcenverbrauch der Digital-Ökonomie – Ein unterschätztes Problem, veröffentlicht bei FERi Cognitive Finance Institute, erschienen am 30.04.2020, https://www.feri-institut.de/media/frhlpjps/fcfcib_digitaloekonomie_202004.pdf, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- Bevacqua, E./Schleussner, C.-F./Zscheischler, J.** (2025, Earth): A Year Above 1.5°C Signals That Earth Is Most Probably Within the 20-year Period That Will Reach the Paris Agreement Limit, veröffentlicht 10.02.2025, <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02246-9>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Biber, A./Knodt, S./Visbeck, M.** (2022, Blue Economy): Sustainable Blue Economy – Transformation, Wert und Potential der marinen Wirtschafts- und Ökosysteme, veröffentlicht bei FERi Cognitive Finance Institute, erschienen am 23.08.2022, Kurzversion verfügbar unter: https://www.feri-institut.de/media/4q1cdqzj/fcfi_blue-economy-202208kurzversion.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Biber, A./Niamir, A./Raffel, T./Tockner, K.** (2024, Biodiversität): Vorteil Biodiversität – Lösungsansätze und Investitionschancen im Einklang mit der Natur, veröffentlicht bei FERi Cognitive Finance Institute, erschienen am 24.07.2024, Kurzversion verfügbar unter: https://www.feri-institut.de/media/trsbfggw/202407_vorteil-biodiversitaet_studie_kurz.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Blackport, R./Screen, J. A.** (2020, Amplification): Insignificant Effect of Arctic Amplification on the Amplitude of Midlatitude Atmospheric Waves, veröffentlicht 19.02.2020, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aay2880>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Blome, N.** (2025, Wahrheiten): Falsche Wahrheiten – 12 linke Glaubenssätze, die unser Land in die Irre führen, DVA, München, 2025.
- BMW** (2024, Kosten): Kosten des Klimawandels – Neuste Erkenntnisse aus der Forschung, veröffentlicht 25.06.2024, <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2024/07/04-kosten-des-klimawandels.html>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- Boers, N.** (2021, Signals): Observation-Based Early-Warning Signals for a Collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation, veröffentlicht 05.08.2021, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Boers, N./Rypdal, M.** (2021, Tipping Point): Critical Slowing Down Suggests That the Western Greenland Ice Sheet Is Close to a Tipping Point, veröffentlicht 17.05.2021, <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2024192118>, zuletzt abgerufen 21.08.2025.
- Böning, C. W./Scheinert, M./Dengg, J./Biastoch, A./Funk, A.** (2006, Subpolar Gyre): Decadal Variability of Subpolar Gyre Transport and its Reverberation in the North Atlantic Overturning, veröffentlicht 29.09.2006, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006GL026906>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- Box, J. E./Fettweis, X./Stroeve, J. C./Tedesco, M./Hall, D. K./Steffen, K.** (2012, Greenland): Greenland Ice Sheet Albedo Feedback: Thermodynamics and Atmospheric Drivers, veröffentlicht 08.08.2012, <https://tc.copernicus.org/articles/6/821/2012/tc-6-821-2012.html>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Caesar, L./Rahmstorf, S./Robinson, A./Feulner, G./Saba, V.** (2018, Fingerprint): Observed Fingerprint of a Weakening Atlantic Ocean Overturning Circulation, veröffentlicht 11.04.2018, <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0006-5>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- CCCA** (2024, Kippunkte): Klimawandel – Einflussfaktoren und Ausprägungen. Kippunkte im Klimasystem, veröffentlicht 2024, https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/FactSheets/47_kippunkte_klimasystem_202401.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.

- CFE-DMHA** (o.A., Case Study): Climate Change Impact Case Study: Hindu Kush Himalaya Region, veröffentlicht o.A., <https://www.cfe-dmha.org/LinkClick.aspx?fileticket=eeXl2clmwn%3D&portalid=0>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Chartrand, S. M./Jellinek, A. M./Kukko, A./Grau Galofre, A./Osinski, G. R./Hibbard, S.** (2023, High Arctic): High Arctic Channel Incision Modulated by Climate Change and the Emergence of Polygonal Ground, veröffentlicht 12.09.2023, <https://www.nature.com/articles/s41467-023-40795-9>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Cohen, J./Francis, J. A./Pfeiffer, K.** (2024, Anomalous): Anomalous Arctic Warming Linked with Severe Winter Weather in Northern Hemisphere Continents, veröffentlicht 03.10.2024, <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01720-0>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Cook, B. I./Mankin, J. S./Marvel, K./Williams, A. P./Smerdon, J. E./Anchukaitis, K. J.** (2020, Drought): Twenty-First Century Drought Projections in the CMIP6 Forcing Scenarios, veröffentlicht 19.04.2020, <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Coumou, D./Di Capua, G./Vavrus, S./Wang, L./Wang, S.** (2018, Amplification): The Influence of Arctic Amplification on Mid-latitude Summer Circulation, veröffentlicht 20.08.2018, <https://www.nature.com/articles/s41467-018-05256-8>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Csillik, O./Keller, M./Longo, M./Ferraz, A./Pinagé, E. R./Görgens, E. B./Ometto, J. P./Silgueiro, V./Brown, D./Duffy, P./Cushman, K. C./Saatchi, S.** (2024, Deforestation): A Large Net Carbon Loss Attributed to Anthropogenic and Natural Disturbances in the Amazon Arc of Deforestation, veröffentlicht 05.08.2024, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2310157121>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Deutloff, J./Held, H./Lenton, T. M.** (2025, Tipping Points): High Probability of Triggering Climate Tipping Points under Current Policies Modestly Amplified by Amazon Dieback and Permafrost Thaw, veröffentlicht 23.04.2025, <https://esd.copernicus.org/articles/16/565/2025/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Ditlevsen, P./Ditlevsen, S.** (2023, Collapse): Warning of a Forthcoming Collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation, veröffentlicht 25.07.2023, <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- DNV** (2025, Outlook): China's Energy Transition Outlook (Energy Transition Outlook China 2024), veröffentlicht 2025, <https://www.dnv.com/publications/china-energy-transition-outlook/>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- DNV** (2025, Transition): Energy Transition Outlook: CCS to 2050, veröffentlicht 12.06.2025, <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/carbon-capture-storage/>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Drijfhout, S./Angevaere, J. R./Mecking, J./van Westen, R. M./Rahmstorf, S.** (2025, Shutdown): Shutdown of Northern Atlantic Overturning After 2100 Following Deep Mixing Collapse in CMIP6 Projections, veröffentlicht 28.08.2025, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/adfa3b>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- DWD** (2022, Kohlenstoffkreislauf): Der marine Kohlenstoffkreislauf, veröffentlicht 2022, https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_promet/Promet_105_Einzelkapitel_PDF/Promet_105_Kap4_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Ember** (2025, Review): Global Electricity Review 2025, veröffentlicht 2025, <https://ember-energy.org/app/uploads/2025/04/Report-Global-Electricity-Review-2025.pdf>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- England, M. R./Polvani, L. M./Screen, J./Chan, A. C.** (2025, Arctic): Minimal Arctic Sea Ice Loss in the Last 20 Years, Consistent With Internal Climate Variability, veröffentlicht 05.08.2025, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2025GL116175>, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- EU-JRC** (2021, Deforestation): Deforestation and Forest Degradation in the Amazon – Status and Trends up To Year 2020, veröffentlicht 08.06.2021, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124955>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- EU-Kommission** (2020, Hydrogen): A Hydrogen Strategy for a Climate-neutral Europe, veröffentlicht 08.07.2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- EZB** (2024, Indicators): Analytical Indicators on Physical Risks, veröffentlicht 2024, https://www.ecb.europa.eu/stats/all-key-statistics/horizontal-indicators/sustainability-indicators/data/html/ecb.climate_indicators_physical_risks.en.html, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- EZB** (2025, Crises): Deepening Our Commitment to Confronting the Climate and Nature Crises, veröffentlicht 04.07.2025, <https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2025/html/ecb.sp250704~167d74e3c3.en.html>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- FERI Cognitive Finance Institute** (2025, Cognitive): Grundlagen und weiterführende Informationen zu Cognitive Finance, veröffentlicht 2025, <https://www.feri-institut.de/cognitive-finance/>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- Flato, G. M.** (2011, Models): Earth System Models: An Overview, veröffentlicht 03.11.2011, <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.148>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- Flores, B. M./Montoya, E./Sakschewski, B./Nascimento, N./Staal, A./Betts, R. A./Levis, C./Lapola, D. M./Esquivel-Muelbert, A./Jakovac, C./Nobre, C. A./Oliveira, R. S./Borma, L. S./Nian, D./Boers, N./Hecht, S. B./ter Steege, H./Arieira, J./Lucas, I. L./Berenguer, E./Marengo, J. A./Gatti, L. V./Mattos, C. R. C./Hirota, M.** (2024, Amazon): Critical Transitions in the Amazon Forest System, veröffentlicht 14.02.2024, <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06970-0>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Forster, P. M./Smith, C./Walsh, T./Lamb, W. F./Lamboll, R./Cassou, C./Hauser, M./Hausfather, Z./Lee, J.-Y./Palmer, M. D./von Schuckmann, K./Slangen, A. B. A./Szopa, S./Trewin, B./Yun, J./Gillett, N. P./Jenkins, St./Matthews, H. D./Raghavan, K./Ribes, A./Rogelj, J./Rosen, D./Zhang, X./Allen, M./Reis, L. A./Andrew, R. M./Betts, R. A./Borger, A./Broersma, J. A./Burgess, S. N./Cheng, L./Friedlingstein, P./Domingues, C. M./Gambarini, M./Gasser, T./Gütschow, J./Ishii, M./Kadow, C./Kennedy, J./Killick, R. E./Krummel, P. B./Liné, A./Monselesan, D. P./Morice, C./Mühle, J./Naik, V./Peters, G. P./Pirani, A./Pongratz, J./Minx, J. C./Rigby, M./Rohde, R./Savita, A./Seneviratne, S. I./Thorne, P./Wells, C./Western, L. M./van der Werf, G. R./Wijffels, S. E./Masson-Delmotte, V./Zhai, P.** (2025, Indicators): Indicators of Global Climate Change 2024: Annual Update of Key Indicators of the State of the Climate System and Human Influence, veröffentlicht 19.06.2025, <https://essd.copernicus.org/articles/17/2641/2025/essd-17-2641-2025.pdf>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.

- Francis, J. A./Vavrus, S. J.** (2012, Amplification): Evidence Linking Arctic Amplification to Extreme Weather in Mid-latitudes, veröffentlicht 17.03.2012, <https://citeseeerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=323b502f4341085045a22adc1bc8f24ae25c1640>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- FSB** (2025, Vulnerabilities): Assessment of Climate-related Vulnerabilities: Analytical Framework and Toolkit, veröffentlicht 16.01.2025, <https://www.fsb.org/2025/01/assessment-of-climate-related-vulnerabilities-analytical-framework-and-toolkit/>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- Future Earth/The Earth League/WCRP** (2023, 10 NICS): 10 New Insights in Climate Science 2023/2024, veröffentlicht 2023, https://10insightsclimate.science/wp-content/uploads/2023/12/10NICS-2023-Report_digital.pdf, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Galera, L. D. A./Eckhardt, T./Beer, C./Pfeiffer, E.-M./Knoblauch, C.** (2023, Ratio): Ratio of In Situ CO₂ to CH₄ Production and Its Environmental Controls in Polygonal Tundra Soils of Samoylov Island, Northeastern Siberia, veröffentlicht 08.03.2023, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2022JG006956>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Gatti, L. V./Basso, L. S./Miller, J. B./Gloor, M./Gatti Domingues, L./Cassol, H. L. G./Tejada, G./Aragão, L. E. O. C./Nobre, C./Peters, W./Marani, L./Arai, E./Sanches, A. H./Corrêa, S. M./Anderson, L./von Randow, C./Correia, C. S. C./Crispim, S. P./Neves, R. A. L.** (2021, Amazonia): Amazonia As a Carbon Source Linked to Deforestation and Climate Change, *Nature*, 595(7867), 388-393, veröffentlicht 2021, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Gidden, M. J./Joshi, S./Armitage, J. J./Christ, A.-B./Boettcher, M./Brutschin, E./Köberle, A. C./Riahi, K./Schellnhuber, H. J./Schleussner, C.-F./Rogelj, J.** (2025, Limit): A Prudent Planetary Limit for Geologic Carbon Storage, veröffentlicht 03.09.2025, <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09423-y>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- GLAMOS** (2025, Glaciers): Winter Snow Accumulation on Swiss Glaciers in 2025, veröffentlicht 2025, https://doi.glamos.ch/pubs/winterrep/winterrep_2025.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Gospodinov, S.** (2023, Systeme): Theorie komplexer Systeme, Verlag Unser Wissen, Scientia Scripta, London/Chisinau, 2023.
- Howden** (2025, Insurability): The Insurability Imperative Using Insurance to Navigate the Climate Transition, veröffentlicht 19.06.2025, <https://huk.howdenprod.com/sites/huk.howdenprod.com/files/2025-06/12440%20CRR%20Insurability%20whitepaper%20-%20Final%20Digital.pdf>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- Hoyos, C. D./Agudelo, P. A./Webster, P. J./Curry, J. A.** (2006, Hurricane): Deconvolution of the Factors Contributing to the Increase in Global Hurricane Intensity, veröffentlicht 07.04.2006, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1123560>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- IFoA** (2024, Scorpion): Climate Scorpion – The Sting Is in the Tail, Institute and Faculty of Actuaries, veröffentlicht 14.03.2024, <https://actuaries.org.uk/media/g1qevrfa/climate-scorpion.pdf>, zuletzt abgerufen 03.09.2025.
- IFoA** (2025, Solvency): Planetary Solvency – Finding Our Balance with Nature, Institute and Faculty of Actuaries, veröffentlicht 16.01.2025, <https://actuaries.org.uk/media/wqeftma1/planetary-solvency-finding-our-balance-with-nature.pdf>, zuletzt abgerufen 03.09.2025.
- IISD** (2025, Report): Summary Report, 62nd Session of the IPCC (IPCC-62), veröffentlicht 2025, <https://enb.iisd.org/intergovernmental-panel-climate-change-ipcc-62-summary>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- IPCC** (2018, Summary): Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C Approved by Governments, veröffentlicht 08.10.2018, <https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- IPCC** (2019, Changing): Special Report, Chapter 5, Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities, veröffentlicht 2019, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/07_SROCC_Ch05_FINAL.pdf, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- IPCC** (2019, Climate): Climate Change and Land, veröffentlicht 2019, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCLL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- IPCC** (2021, Climate): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, veröffentlicht 2021, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf, zuletzt abgerufen am 20.08.2025.
- IPCC** (2023, Summary): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, veröffentlicht 07.2023, https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- IPCC** (2023, Report): AR6 Synthesis Report – Climate Change 2023, Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, veröffentlicht 2023, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- IPCC** (2023, Statements): Headline Statements, veröffentlicht 2023, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- IPCC** (2024, Synthesebericht): Synthesebericht zum Sechsten IPCC-Sachstandsbericht (AR6) – Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung (SPM), deutsche Übersetzung, veröffentlicht 19.04.2024, https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_AR6-SYR.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- IPCC** (2025, Outlines): Chapter Outlines of the Working Group I Contribution to the IPCC Seventh Assessment Report (AR7), Annex 1, veröffentlicht 28.02.2025, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2025/03/Decision-8-Working-Group-Outlines.pdf>, zuletzt abgerufen am 03.09.2025.
- IPCC** (2025, Reports): Reports, veröffentlicht 2025, <https://www.ipcc.ch/reports/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.

- IPCC** (2028/29, Report): Seventh Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, derzeit noch in Vorbereitung und Umsetzung, (Veröffentlichung noch ausstehend).
- IRENA** (2025, Statistics): Renewable Capacity Statistics 2025, veröffentlicht 2025, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Statistics_2025.pdf, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Jahn, A./Holland, M. M./Kay, J. E.** (2024, Projections): Projections of an Ice-free Arctic Ocean, veröffentlicht 03.2024, <https://www.nature.com/articles/s43017-023-00515-9.epdf>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Kemp, L./Xu, C./Depledge, J./Lenton, T.** (2022, Endgame): Climate Endgame: Exploring Catastrophic Climate Change Scenarios, veröffentlicht 01.08.2022, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2108146119>, zuletzt abgerufen am 05.09.2025.
- Kilbourne, K. H./Wanamaker, A. D./Moffa-Sanchez, P./Reynolds, D. J./Amrhein, D. E./Butler, P. G./Gebbie, G./Goes, M./Jansen, M. F./Little, C. M./Mette, M./Moreno-Chamarro, E./Ortega, P./Otto-Bliesner, B. L./Rossby, T./Scourse, J./Whitney, N. M.** (2022, Uncertain): Atlantic Circulation Change Still Uncertain, veröffentlicht 17.02.2022, <https://www.nature.com/articles/s41561-022-00896-4>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Kopp, M./Rapp, H.-W./Schaefers, K.** (2017, Bubble): Carbon Bubble und Dekarbonisierung – Unterschätzte Risiken für Investoren und Vermögensinhaber, veröffentlicht bei FERI Cognitive Finance Institute, erschienen am 02.01.2017, Kurzversion unter: https://www.feri-institut.de/media/42ihvufh/fcfi_wwf-201701kurzversion.pdf, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- Kornhuber, K./Klönne, U./Kellou, D./Schleußner, C.-F./Climate Analytics gGmbH** (2024, Kippdynamiken): Kippunkte und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem: Erkenntnisse, Risiken sowie klima- und sicherheitspolitische Relevanz, Abschlussbericht, hrsg. von Umweltbundesamt, veröffentlicht 08.2024, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/08_2024_cc_kippunkte_und_kaskadische_kippdynamiken.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Kotz, M./Levermann, A./Wenz, L.** (2024, Commitment): The Economic Commitment of Climate Change, veröffentlicht 17.04.2024, <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07219-0>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- Kotz, M./Levermann, A./Wenz, L.** (2025, Correction): Author Correction of „The Economic Commitment of Climate Change“, veröffentlicht 13.08.2025, <https://zenodo.org/records/15984134>, zuletzt abgerufen am 15.09.2025.
- Kriegler, E./Hall, J. W./Held, H./Dawson, R./Schellnhuber, H. J.** (2009, Tipping Points): Imprecise Probability Assessment of Tipping Points in the Climate System, veröffentlicht 31.03.2009, <https://doi.org/10.1073/pnas.0809117106>, zuletzt abgerufen am 20.08.2025.
- Latif, M.** (2020, Heißezeit): Heißezeit: Mit Vollgas in die Klimakatastrophe – und wie wir auf die Bremse treten, Verlag Herder, Freiburg/Basel/Wien, 2020.
- Lenton, T. M./Held, H./Kriegler, E./Hall, J. W./Lucht, W./Rahmstorf, S./Schellnhuber, H. J.** (2008, Tipping): Tipping Elements in the Earth's Climate System, veröffentlicht 12.02.2008, <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.0705414105>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Lenton, T. M./Rockström, J./Gaffney, O./Rahmstorf, S./Richardson, K./Steffen, W./Schellnhuber, H. J.** (2019, Climate Tipping Points): Climate Tipping Points — Too Risky to Bet against, veröffentlicht 27.11.2019, <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Lenton, T. M./Xu, C./Abrams, J. F./Ghadiali, A./Lorioni, S./Sakschewski, B./Zimm, C./Ebi, K. L./Dunn, R. R./Svenning, J.-C./Scheffer, M.** (2023, Human Cost): Quantifying the Human Cost of Global Warming, veröffentlicht 22.05.2023, <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01132-6>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Lohmann, G. (Hrsg.)** (2025, Klimagespräche): Klimagespräche – Interviews mit Klimawissenschaftler*innen, Springer Professional, Berlin/Heidelberg, 2025.
- Lorioni, S./Bartsch, A./Calamita, E./Donges, J. F./Hebden, S./Hirota, M./Landolfi, A./Nagler, T./Sakschewski, B./Staal, A./Verbesselt, J./Winkelmann, R./Wood, R./Wunderling, N.** (2025, Monitoring): Monitoring the Multiple Stages of Climate Tipping Systems from Space: Do the GCOS Essential Climate Variables Meet the Needs?, veröffentlicht 18.02.2025, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-024-09866-4>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Lovejoy, T./Nobre, C.** (2018, Amazon): Amazon Tipping Point, veröffentlicht 21.02.2018, <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aat2340>, zuletzt abgerufen am 20.08.2025
- Lovejoy, T./Nobre, C.** (2019, Amazon): Amazon Tipping Point: Last Chance for Action, veröffentlicht 20.12.2019, <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aba2949>, zuletzt abgerufen am 20.08.2025.
- Lupo, A./Kininmonth, W.** (2013, Models): Global Climate Models and Their Limitations, veröffentlicht 2013, https://weather.missouri.edu/gcc/_09-09-13_%20Chapter%201%20Models.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Mandelbrot, B.** (1990, Fractal): The Fractal Geometry of Nature, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1990.
- Mannerfeldt, E. S./Dehecq, A./Hugonnet, R./Hodel, E./Huss, M./Bauder, A./Farinotti, D.** (2022, Halving): Halving of Swiss Glacier Volume since 1931 Observed from Terrestrial Image Photogrammetry, veröffentlicht 22.08.2022, <https://tc.copernicus.org/articles/16/3249/2022/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Marengo, J. A./Cunha, A. P./Espinoza, J.-C./Fu, R./Schöngart, J./Jimenez, J. C./Costa, M. C./Ribeiro, J. M./Wongchuig, S./Zhao, S.** (2024, Drought): The Drought of Amazonia in 2023-2024, veröffentlicht 2024, <https://hal.science/hal-04723441/>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Meckie, E.** (2021, Tipping Points): Tipping Points in the Earth System. COP26 Universities Network Climate Risk Note, veröffentlicht Nov. 2021, <https://www.cambridge.org/engage/api-gateway/coe/assets/orp/resource/item/61b0c47c476fcd37240b7c05/original/tipping-points-in-the-earth-system.pdf>, zuletzt abgerufen 03.09.2025.

- Merchant, C. J./Allan, R. P./Embury, O.** (2025, Warming): Quantifying the Acceleration of Multidecadal Global Sea Surface Warming Driven by Earth's Energy Imbalance, veröffentlicht 28.01.2025, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/adaa8a/pdf>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Möller, T./Högner, A. E./Schleußner, C.-F./Bien, S./Kitzmann, N. H./Lamboll, R. D./Rogelj, J./Donges, J. F./Rockström, J./Wunderling, N.** (2024, Tipping Risks): Achieving Net Zero Greenhouse Gas Emissions Critical to Limit Climate Tipping Risks, veröffentlicht 01.08.2024, <https://www.nature.com/articles/s41467-024-49863-0.pdf>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Myhre, G./Hodnebrog, Ø./Loeb, N./Forster, P. M.** (2025, Models): Observed Trend in Earth Energy Imbalance May Provide a Constraint for Low Climate Sensitivity Models, veröffentlicht 12.06.2025, <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.adt0647>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- Nijse, F./Sharpe, S./Sahastrabudde, R./Lenton, T. M.** (2024, Cascade): A Positive Tipping Cascade in Power, Transport, and Heating, veröffentlicht 2024, <https://global-tipping-points.org/download/2026/>, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- Nitzbon, J./Schneider von Deimling, T./Aliyeva, M./Chadburn, S. E./Grosse, G./Laboor, S./Lee, H./Lohmann, G./Steinert, N. J./Stuenzi, S. M./Werner, M./Westermann, S./Langer, M.** (2024, Permafrost-Thaw): No Respite from Permafrost-Thaw Impacts in the Absence of a Global Tipping Point, veröffentlicht 03.06.2024, <https://www.nature.com/articles/s41558-024-02011-4>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- Nobre, C. A./Sampaio, G./Borma, L. S./Castilla-Rubio, J. C./Silva, J. S./Cardoso, M.** (2016, Risks): Land-Use and Climate Change Risks in the Amazon and the Need of a Novel Sustainable Development Paradigm, veröffentlicht 16.09.2016, <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Nobre, C. A./Marengo, J. A./Soares, W. R.** (2019, Brazil): Climate Change Risks in Brazil, Springer International Publishing, Cham, 2019.
- Nordhaus, W. D.** (2018, Lecture): Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics*, Prize Lecture, veröffentlicht 08.12.2018, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/nordhaus-lecture.pdf>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- Nordhaus, W. D.** (2024, DICE): DICE-Folders, zuletzt aktualisiert 23.05.2024, <https://yale.app.box.com/s/whlqcr7gtzdm4nxnrfhvp2hlzbeuvvm>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- OECD** (2022, Climate Tipping Points): Climate Tipping Points: Insights for Effective Policy Action, OECD Publishing, Paris, veröffentlicht 2022, https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/12/climate-tipping-points_9994de90/abc5a69e-en.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Olonscheck, D./Rugenstein, M.** (2024, Models): Coupled Climate Models Systematically Underestimate Radiation Response to Surface Warming, veröffentlicht 13.03.2024, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023GL106909>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Park, S.-W./Mun, J.-H./Lee, H./Steinert, N. J./An, S.-I./Shin, J./Kug, J.-S.** (2025, Permafrost): Continued Permafrost Ecosystem Carbon Loss under Net-Zero and Negative Emissions, veröffentlicht 12.02.2025, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adn8819>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Parsons, L. A.** (2020, Implications): Implications of CMIP6 Projected Drying Trends for 21st Century Amazonian Drought Risk, veröffentlicht 29.09.2020, <https://doi.org/10.1029/2020EF001608>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Paul, M.** (2022, Nordpol): Der Kampf um den Nordpol, Verlag Herder, Freiburg, 2022.
- Pearce-Kelly, P./Altieri, A. H./Bruno, J. F./Cornwall, C. E./McField, M./Muñiz-Castillo, A. I./Rocha, J./Setter, R. O./Sheppard, C./Roman-Cuesta, R. M./Yesson, C.** (2025, Coral Reefs): Considerations for Determining Warm-Water Coral Reef Tipping Points, veröffentlicht 07.02.2025, <https://esd.copernicus.org/articles/16/275/2025/esd-16-275-2025.html>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- PIK** (2019, Kippunkte): Kippunkte im Klimasystem, veröffentlicht 06.2019, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, veröffentlicht 06.2019, <https://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Kippunkte%20im%20Klimasystem%20-%20Update%202019.pdf>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Rahmstorf, S.** (1996, Circulation): On the Freshwater Forcing and Transport of the Atlantic Thermohaline Circulation, veröffentlicht 10.02.1996, https://link.springer.com/epdf/10.1007/s003820050144?sharing_token=jpy9G8sXMqjUbpBZX7edT_e4RwIQNchNByi7wb-cMAY77PGoA72rxCpwJOvHcDxBwF3QYooH22Xqtic3UKFw8P6Byq2kdTWMofJZelxZSTpQIFc8Hfo88nI40ADrKJVDJF42poVd4zx46dgov-JEvqA%3D%3D, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Rahmstorf, S.** (2023, Atlantikzirkulation): Die Atlantikzirkulation: Kippt sie schon in diesem Jahrhundert, oder nicht?, veröffentlicht 27.08.2023, <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/die-atlantikzirkulation-kippt-sie-schon-in-diesem-jahrhundert-oder-nicht/>, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Rahmstorf, S.** (2024, Tipping Point): Is the Atlantic Overturning Circulation Approaching a Tipping Point?, veröffentlicht 09.2024, in: Oceanography, Vol. 37, Nr. 3, S. 17-29, <https://tos.org/oceanography/assets/docs/37-rahmstorf.pdf>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Rahmstorf, S./Crucifix, M./Ganopolski, A./Goosse, H./Kamenkovich, I./Knutti, R./Lohmann, G./Marsh, R./Mysak, L. A./Wang, Z./Weaver, A. J.** (2005, Hysteresis): Thermohaline Circulation Hysteresis: A Model Intercomparison, veröffentlicht 06.12.2005, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL023655>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Rahmstorf, S./Box, J. E./Feulner, G./Mann, M. E./Robinson, A./Rutherford, S./Schaffernicht, E. J.** (2015, Exceptional): Exceptional Twentieth-Century Slowdown in Atlantic Ocean Overturning Circulation, veröffentlicht 23.03.2015, <https://www.nature.com/articles/nclimate2554>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Rahmstorf, S./Levermann, A./Winkelmann, R./Donges, J./Caesar, L./Sakschewski, B./Thonicke, K.** (2019, Kippunkte): Kippunkte im Klimasystem, veröffentlicht 06.2019, <https://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Kippunkte%20im%20Klimasystem%20-%20Update%202019.pdf>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.

- Rantanen, M./Karpechko, A. Yu./Lipponen, A./Nordling, K./Hyvärinen, O./Ruosteenoja, K./Vihma, T./Laaksonen, A.** (2022, Arctic): The Arctic Has Warmed Nearly Four Times Faster than the Globe since 1979, veröffentlicht 11.08.2022, <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00498-3>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Rapp, H.-W.** (2021, Progression): „The Great Progression“ – Das Jahrzehnt massiver Beschleunigung, veröffentlicht bei FERI Cognitive Finance Institute, erschienen am 16.03.2021, Kurzversion unter: https://www.feri-institut.de/media/1nxbwxi/fcfi_greatprogression-202103-kurzversion.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Rapp, H.-W.** (2024, Trump): „Trump reloaded“ – Drohender Umbau der USA in eine Präsidialdiktatur, veröffentlicht bei FERI Cognitive Finance Institute, erschienen am 29.01.2024, https://www.feri-institut.de/media/lvba5ww/fcfi_trump-reloaded_202401_cc.pdf, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Rapp, H.-W.** (2025, Big Picture): Big Picture: 2025, veröffentlicht bei FERI Cognitive Finance Institute, erschienen am 03.02.2025, https://www.feri-institut.de/media/eozk33zf/fcfi_202501_big-picture.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Rapp, H.-W./Cortés, A.** (2017, Cognitive): Cognitive Finance: Neue Sicht auf Wirtschaft und Finanzmärkte, Springer Gabler, Wiesbaden, 2017.
- Reisinger, A./Fuglestedt, J. S./Pirani, A./Geden, O./Jones, C. D./Maharaj, S./Poloczanska, E. S./Morelli, A./Johansen, T. G./Adler, C./Betts, R. A./Seneviratne, S. I.** (2025, Overshoot): Overshoot: A Conceptual Review of Exceeding and Returning to Global Warming of 1.5°C, veröffentlicht 14.04.2025, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-111523-102029>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Réthy-Jensen, I.** (2025, Capture): Carbon Capture – Dekarbonisierung durch CO₂-Entnahme, veröffentlicht bei FERI Cognitive Finance Institute, erschienen am 27.02.2025, https://www.feri-institut.de/media/wcofmmoi/202502_carbon-capture_cb.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Richardson, K./Steffen, W./Lucht, W./Bendtsen, J./Cornell, S. E./Donges, J. F./Drüke, M./Fetzer, I./Bala, G./von Bloh, W./Feulner, G./Fiedler, St./Gerten, D./Gleeson, T./Hofmann, M./Huiskamp, W./Kummu, M./Mohan, C./Nogués-Bravo, D./Petri, St./Porkka, M./Rahmstorf, St./Schaphoff, S./Thonicke, K./Tobian, A./Virkki, V./Wang-Erlandsson, L./Weber, L./Rockström, J.** (2023, Boundaries): Earth beyond Six of Nine Planetary Boundaries, veröffentlicht 13.09.2023, <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/sciadv.adh2458>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Romanowsky, E./Handorf, D./Jaiser, R./Wohltmann, I./Dorn, W./Ukita, J./Cohen, J./Dethloff, K./Rex, M.** (2019, Stratospheric): The Role of Stratospheric Ozone for Arctic-midlatitude Linkages, veröffentlicht 28.05.2019, <https://www.nature.com/articles/s41598-019-43823-1>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Rounce, D. R./Hock, R./Maussion, F./Hugonnet, R./Kochtitzky, W./Huss, M./Berthier, E./Brinkerhoff, D./Compagno, L./Copland, L./Farinotti, D./Menounos, B./Mcnabb, R. W.** (2023, Glacier): Global Glacier Change in the 21st Century: Every Increase in Temperature Matters, veröffentlicht 05.01.2023, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abo1324>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Scheppat, B./Coleman, D./Werner, M.** (2022, Wasserstoff): Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft: Grundlagen, Konzepte und mögliche Anwendungsbereiche, veröffentlicht bei FERI Cognitive Finance Institute, erschienen am 11.01.2022, Kurzversion unter: https://www.feri-institut.de/media/mc1jqfxj/fcfi_wasserstoff_20211221_final_kurzversion.pdf, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.
- Schuster, L./Maussion, F./Rounce, D. R./Ultee, L./Schmitt, P./Lacroix, F./Frölicher, T. L./Schleußner, C.-F.** (2025, Irreversible): Irreversible Glacier Change and Trough Water for Centuries after Overshooting 1.5 °C, veröffentlicht 19.05.2025, <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02318-w>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- SCNAT** (2008, Stern-Report): Deutsche Zusammenfassung des Stern-Reports veröffentlicht, veröffentlicht 2008, https://scnat.ch/de/uuid/i/cf9b8bd8-25e3-507b-95f1-3a071b4473a3-Deutsche_Zusammenfassung_des_Stern-Reports_ver%C3%B6ffentlicht, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- Smith, D./Screen, J. A./Deser, C./Cohen, J./Fyfe, J. C./García-Serrano, J./Jung, T./Kattsov, V./Matei, D./Msadek, R./Peings, Y./Sigmond, M./Ukita, J./Yoon, J.-H./Zhang, X.** (2019, Amplification): The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) Contribution to CMIP6: Investigating the Causes and Consequences of Polar Amplification, veröffentlicht 03.2019, https://www.researchgate.net/publication/332264381_The_Polar_Amplification_Model_Intercomparison_Project_PAMIP_contribution_to_CMIP6_investigating_the_causes_and_consequences_of_polar_amplification, zuletzt abgerufen am 11.09.2025.
- Sornette, D.** (2009, Phenomena): Critical Phenomena in Natural Sciences. Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder: Concepts and Tools, 2. Aufl., Springer, Berlin/Heidelberg, 2009.
- 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./Winkelmann, R./Schellnhuber, H. J.** (2018, Trajectories): Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, veröffentlicht 06.08.2018, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1810141115>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Stern** (2006, Economics): The Economics of Climate Change: The Stern Review, veröffentlicht 30.10.2006, <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/the-economics-of-climate-change-the-stern-review/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Stokes, C. R./Bamber, J. L./Dutton, A./DeConto, R. M.** (2025, Warming): Warming of +1.5 °C Is Too High for Polar Ice Sheets, veröffentlicht 20.05.2025, <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02299-w#citeas>, zuletzt abgerufen am 20.08.2025.
- Stommel, H.** (1961, Convection): Thermohaline Convection with Two Stable Regimes of Flow, veröffentlicht 21.01.1961, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.2153-3490.1961.tb00079.x>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Swingedouw, D./Fichefet, T./Huybrechts, P./Goosse, H./Driesschaert, E./Loutre, M.-F.** (2008, Melting): Antarctic Ice-sheet Melting Provides Negative Feedbacks on Future Global Warming, veröffentlicht 2008, https://meetings.pices.int/publications/presentations/Climate_Change_2008/Climate_Change_2008_S1_2/S1_2_Swingedouw.pdf, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.

- Swingedouw, D./Fichefet, T./Huybrechts, P./Goosse, H./Driesschaert, E./Loutre, M.-F.** (2008, Feedbacks): Antarctic Ice-sheet Melting Provides Negative Feedbacks on Future Climate Warming, veröffentlicht 2008, <https://meetings.copernicus.org/www.cosis.net/abstracts/EGU2008/01226/EGU2008-A-01226.pdf>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- TIPMIP** (2025, TIPMIP): The Tipping Points Modelling Intercomparison Project (TIPMIP), veröffentlicht 2025, <https://tipmip.org/>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Trust, S./Saye, L./Bettis, O./Bedenham, G./Hampshire, O./Lenton, T. M./Abrams, J. F.** (2025, Planetary Solvency): Planetary Solvency – Finding Our Balance with Nature. Global Risk Management for Human Prosperity, veröffentlicht 01.2025, <https://global-tipping-points.org/wp-content/uploads/2025/01/planetary-solvency-finding-our-balance-with-nature.pdf>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Turetsky, M. R./Abbott, B. W./Jones, M. C./Anthony, K. W./Olefeldt, D./Schuur, E. A. G./Koven, C./McGuire, A. D./Grosse, G./Kuhry, P./Hugelius, G./Lawrence, D. M./Gibson, C./Sannel, A. B. K.** (2019, Permafrost): Permafrost Collapse Is Accelerating Carbon Release, veröffentlicht 30.04.2019, <https://www.nature.com/articles/d41586-019-01313-4>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2023, Kippdynamiken): Kippunkte und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem, Factsheet, veröffentlicht 20.11.2023, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_kippunkte_und_kaskadische_kippdynamiken.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2024, Kippdynamiken): Kippunkte und kaskadische Kippdynamiken im Klimasystem, veröffentlicht 01.2024, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/08_2024_cc_kippunkte_und_kaskadische_kippdynamiken.pdf, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2024, Übereinkommen): Die Globale Bestandsaufnahme unter dem Übereinkommen von Paris, veröffentlicht 15.05.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris/begleitung-der-ersten-globalen-bestandsaufnahme>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2025, 1,5-Grad-Ziel): Das 1,5-Grad-Ziel nach dem Übereinkommen von Paris, veröffentlicht 15.04.2025, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris/das-15-grad-ziel-nach-dem-uebereinkommen-von-paris>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- UNDP** (2023, Climate): The Climate Dictionary, veröffentlicht 08.08.2023, <https://www.undp.org/publications/climate-dictionary>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- UNEP** (2024, Assessment): Physical Climate Risk Assessment and Management: An Investor Playbook, veröffentlicht 10.2024, <https://www.unepfi.org/themes/climate-change/physical-climate-risk-assessment-and-management-an-investor-playbook/>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- UNEP** (2024, Gap): Emissions Gap Report 2024, veröffentlicht 24.10.2024, <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.
- UN-FAO** (2020, Forest): Global Forest Resources Assessment 2020, aktualisiert 18.11.2020, <https://openknowledge.fao.org/items/d6f0df61-cb5d-4030-8814-0e466176d9a1>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- University of Exeter, Global Tipping Points** (2023, Report): Global Tipping Points Report 2023, veröffentlicht 2023, <https://report-2023.global-tipping-points.org/download/4608/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- University of Exeter, Global Tipping Points** (2025, Report): Global Tipping Points Report 2025, veröffentlicht am 13.10.2025, <https://global-tipping-points.org/>, zuletzt abgerufen am 13.10.2025.
- Usman, S./Parker, M./Vallat, M.** (2025, Impact): Dry-Roasted NUTS: Early Estimates of the Regional Impact of 2025 Extreme Weather, veröffentlicht 14.09.2025, <https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/5484206.pdf?abstractid=5484206&mirid=1>, zuletzt abgerufen am 16.09.2025.
- van Westen, R. M./Kliphuis, M./Dijkstra, H. A.** (2024, Tipping Course): Physics-based Early Warning Signal Shows That AMOC Is on Tipping Course, veröffentlicht 09.02.2024, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adk1189>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Waldrop, M. M.** (1993, Complexity): Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, Simon & Schuster, New York, 1993.
- WCRP** (2008, Climate Models): Climate Models – An Assessment of Strengths and Limitations, veröffentlicht 07.2008, <https://www.wcrp-climate.org/images/modelling/WGCM/publications/sap3-climate-models.pdf>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- Weertmann, J.** (1974, Stability): Stability of the Junction of an Ice Sheet and an Ice Shelf, Erstveröffentlichung 1974, Journal of Glaciology, Vol. 13, Nr. 67, online veröffentlicht: 30.01.2017, <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/stability-of-the-junction-of-an-ice-sheet-and-an-ice-shelf/489C95706873563AC12394FB713CD91C>, zuletzt abgerufen 02.09.2025.
- WEF** (2024, Inaction): The Cost of Inaction: A CEO Guide to Navigating Climate Risk, veröffentlicht 12.2024, https://reports.weforum.org/docs/WEF_The_Cost_of_Inaction_2024.pdf, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- WEF** (2025, Risks): The Global Risks Report 2025, veröffentlicht 01.2025, https://reports.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2025.pdf, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- Weltbank** (2022, Assessment): Physical Climate Risk Assessment: Practical Lessons for the Development of Climate Scenarios with Extreme Weather Events from Emerging Markets and Developing Economies, veröffentlicht 09.2022, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099657511082325958/pdf/IDU0004b1eec0d7f304e7c0967305183f75f92a2.pdf>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- WGMS** (2023, Bulletin): Global Glacier Change Bulletin. Bulletin No. 5 (2020-2021), veröffentlicht 2023, https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_05.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.

- Winkelmann, R./Dennis, D. P./Donges, J. F./Loriani, S./Klose, A. K./Abrams, J. F./Alvarez-Solas, J./Albrecht, T./Armstrong McKay, D./Bathiany, S./Blasco Navarro, J./Brovkin, V./Burke, E./Danabasoglu, G./Donner, R. V./Drüke, M./Georgievski, G./Goelzer, H./Harper, A. B./Hegerl, G./Hirota, M./Hu, A./Jackson, L. C./Jones, C./Kim, H./Koenigk, T./Lawrence, P./Lenton, T. M./Liddy, H./Licón-Saláiz, J./Menthon, M./Montoya, M./Nitzbon, J./Nowicki, S./Otto-Bliesner, B./Pausata, F./Rahmstorf, S./Ramin, K./Robinson, A./Rockström, J./Romanou, A./Sakschewski, B./Schädel, C./Sherwood, S./Smith, R. S./Steinert, N. J./Swingedouw, D./Willeit, M./Weijer, W./Wood, R./Wyser, K./Yang, S. (2025, TIPMIP): The Tipping Points Modelling Intercomparison Project (TIPMIP): Assessing Tipping Point Risks in the Earth System (Preprint), zur Diskussion eingereicht 18.06.2025, https://pure.mpg.de/pubman/item/item_3655436_2/component/file_3655448/gea0502pre.pdf, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- WMO (2022, Update): WMO Global Annual to Decadal Climate Update, veröffentlicht 2022, https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/WMO_GADCU_2022-2026.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- WMO (2024, Update): State of the Climate 2024 Update for COP29, veröffentlicht 11.11.2024, <https://wmo.int/publication-series/state-of-climate-2024-update-cop29>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- WMO (2025, Climate): State of the Global Climate 2024, veröffentlicht 19.03.2025, <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- World Ocean Review (2010, Klimasystem): Ein komplexes Gefüge – das Klimasystem der Erde, veröffentlicht 2010, <https://worldoceanreview.com/de/wor-1/klimasystem/klimasystem-der-erde/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- World Ocean Review (2010, Weltmeere): Die Weltmeere, Motor des globalen Klimas, veröffentlicht 2010, https://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor1/WOR1_de.pdf, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- World Ocean Review (2019, Polarregionen): Arktis und Antarktis – Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Polarregionen, veröffentlicht 2019, <https://worldoceanreview.com/de/wor-6/die-auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-polarregionen/der-rueckzug-des-eises>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- World Ocean Review (2024, Klimakrise): Dringlichst gesucht – Wege aus der Klimakrise, veröffentlicht 2024, https://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor8/WOR8_de_Kapitel_1.pdf, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- World Ocean Review (2024, Kohlendioxid): Kohlendioxid verpressen tief unter dem Meer, veröffentlicht 2024, <https://worldoceanreview.com/de/wor-8/kohlendioxid-verpressen-tief-unter-dem-meer/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- World Ocean Review (2024, Kohlenstoffkreislauf): Die Rolle des Ozeans im Kohlenstoffkreislauf der Erde, veröffentlicht 2024, <https://worldoceanreview.com/de/wor-8/die-rolle-des-ozeans-im-kohlenstoffkreislauf-der-erde/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- Wunderling, N. (2021, Dynamiken): Nonlinear Dynamics and Interactions of Tipping Elements in the Earth System – Nichtlineare Dynamiken und Interaktionen von Kippelementen im Erdsystem, Dissertation, Potsdam, 2021.
- Wunderling, N./Willeit, M./Donges, J. F./Winkelmann, R. (2020, Global Warming): Global Warming Due to Loss of Large Ice Masses and Arctic Summer Sea Ice, veröffentlicht 27.10.2020, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18934-3>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Wunderling, N./Donges, J. F./Kurths, J./Winkelmann, R. (2021, Climate Domino Effects): Interacting Tipping Elements Increase Risk of Climate Domino Effects under Global Warming, in: Earth System Dynamics, 12(2), (2021): 601-619, veröffentlicht 03.06.2021, <https://esd.copernicus.org/articles/12/601/2021/esd-12-601-2021.pdf>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- Wunderling, N./Staal, A./Sakschewski, B./Hirota, M./Tuinenburg, O. A./Donges, J. F./Barbosa, H. M. J./Winkelmann, R. (2022, Droughts): Recurrent Droughts Increase Risk of Cascading Tipping Events by Outpacing Adaptive Capacities in the Amazon Rainforest, veröffentlicht 02.08.2022, <https://doi.org/10.1073/pnas.2120777119>, zuletzt abgerufen am 20.08.2025.
- Wunderling, N./Winkelmann, R./Rockström, J./Loriani, S./Armstrong McKay, D. I./Ritchie, P. D. L./Sakschewski, B./Donges, J. F. (2023, Overshoots): Global Warming Overshoots Increase Risks of Climate Tipping Cascades in a Network Model, Natural Climate Change, 13, 75–82 (2023), <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01545-9>, zuletzt abgerufen am 21.08.2025.
- Wunderling, N./von der Heydt, A. S./Aksenov, Y./Barker, S./Bastiaansen, R./Brovkin, V./Brunetti, M./Couplet, V./Kleinen, T./Lear, C. H./Lohmann, J./Roman-Cuesta, R. M./Sinet, S./Swingedouw, D./Winkelmann, R./Anand, P./Barichivich, J./Bathiany, S./Baudena, M./Bruun, J. T./Chiessi, C. M./Coxall, H. K./Docquier, D./Donges, J. F./Falkena, S. K. J./Klose, A. K./Obura, D./Rocha, J./Rynders, S./Steinert, N. J./Willeit, M. (2024, Interactions and Cascades): Climate Tipping Point Interactions and Cascades: A Review, Earth System Dynamics, 15, 41–74, veröffentlicht 26.01.2024, <https://doi.org/10.5194/esd-15-41-2024>, zuletzt abgerufen am 20.08.2025.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie (2024, Geschenk): Kein „Geschenk Gottes“ – Eine erste Analyse der COP29 in Baku, veröffentlicht 11.2024, https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/publications/COP29-Report_de.pdf, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- WWF (2007, Amazonas): Der Teufelskreis am Amazonas, veröffentlicht 2007, <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Amazonas/Teufelskreis-am-Amazonas-Klimawandel-und-Waelder.pdf>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- WWF (2021, Pol): Klimawandel: Der „dritte Pol“ der Erde schmilzt, veröffentlicht 22.02.2021, <https://www.wwf.de/themen-projekte/projektregionen/himalaja-region/klimawandel-der-dritte-pol-der-erde-schmilzt>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- WWF (2022, Amazon): Risking the Amazon: Why We Need Immediate Action to Reduce the Tipping Point Risk, veröffentlicht 11.2022, <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Amazonas/WWF-UK-Technical-Briefing-Risking-the-amazon.pdf>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- WWF (2022, Planet): Living Planet Report 2022, veröffentlicht 2022, <https://www.wwf.de/living-planet-report-2022>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- WWF (2024, Kollaps): Der Amazonas vor dem Kollaps, veröffentlicht 04.06.2024, <https://www.wwf.de/themen-projekte/projektregionen/amazonien/der-amazonas-vor-dem-kollaps>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- WWF (2024, Planet): Living Planet Report 2024, veröffentlicht 2024, <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF/Living-Planet-Report-2024-English-Version.pdf>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.

Zeitungsartikel und Internetquellen

- 10Insights** (2025, Overshooting): 10Insights Climate Science: Overshooting 1.5°C Is Fast Becoming Inevitable. Minimising the Magnitude and Duration of Overshoot Is Essential, veröffentlicht 2025, <https://10insightsclimate.science/year-2023/1-overshooting-fast-becoming-inevitable/>, zuletzt abgerufen am 03.09.2025.
- Arctic Death Spiral** (2025, Spiral): What's the Arctic Death Spiral?, veröffentlicht 2025, <https://www.arcticdeathspiral.org/>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- ARD alpha** (2023, Stürme): Mehr Hitzewellen, Starkregen und Stürme, veröffentlicht 24.03.2023, <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/wetter-meteorologie-hitze-starkregen-extremwetter-klimawandel-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- ARD alpha** (2024, Wärmepumpe): Die Wärmepumpe für Nordeuropa, veröffentlicht 19.03.2024, <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/golfstrom-meeresstroemung-klimawandel-erwaermung-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Asakawa, M.** (2025, Dach): Das Dach der Welt schmilzt, veröffentlicht 21.02.2025, <https://www.project-syndicate.org/commentary/himalayan-mountains-glacial-melt-catastrophic-consequences-by-masatsugu-asakawa-2025-02/german>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- AWI** (2015, Permafrost): Permafrost (Factsheet), Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, veröffentlicht 11.2015, https://epic.awi.de/id/eprint/46574/1/WEB_DE_Factsheet_Permafrost.pdf, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- AWI** (2019, Wetterextreme): Erwärmung der Arktis führt zu Wetterextremen in unseren Breiten, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, veröffentlicht 28.05.2019, <https://www.awi.de/ueber-uns/service/presse/presse-detailansicht/erwaermung-der-arktis-fuehrt-zu-wetterextremen-in-unseren-breiten.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- AWI** (2023, Erwärmung): Globale Erwärmung erreicht die Mitte Grönlands, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, veröffentlicht 18.01.2023, <https://www.awi.de/ueber-uns/service/presse/presse-detailansicht/globale-erwaermung-erreicht-die-mitte-groenlands.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- AWI** (2025, AMOC): Wie steht es um die AMOC?, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft, veröffentlicht 12.06.2025, <https://www.awi.de/ueber-uns/service/presse/presse-detailansicht/default-b7f0980303ecb767c722d7163b5c390e-1.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- BaFin** (2025, Verbesserungspotenzial): „Es gibt noch klares Verbesserungspotenzial“, veröffentlicht 09.05.2025, https://www.bafin.de/SharedDocs/Veroeffentlichungen/DE/Fachartikel/2025/fa_250509_SF_Konferenz_Namensbeitrag_P.html, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- BaFin** (2025, ESG): ESG im Risikomanagement, veröffentlicht 15.07.2025, https://www.bafin.de/DE/Aufsicht/SF/Risikomanagement/Risikomanagement_node.html, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- Bardouille, P./Mohieldin, M.** (2025, Klimaresilienz): Klimaresilienz ist eine strategische Investition, veröffentlicht 13.08.2025, <https://www.project-syndicate.org/commentary/fiscal-frameworks-should-treat-investments-in-resilience-as-productive-by-pepukaye-bardouille-and-mahmoud-mohieldin-2025-08/german>, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- Berkeley Earth** (2025, Temperature): Global Temperature Report for 2024, veröffentlicht 10.01.2025, <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2024>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Bild der Wissenschaft** (2023, Eisfrei): Nordwest-Grönland war vor 400.000 Jahren eisfrei, veröffentlicht 20.07.2023, <https://www.wissenschaft.de/erde-umwelt/klimageschichte/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2019, Tauen): Tauen von Permafrost an einer arktischen Küste, veröffentlicht 14.03.2019, https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Datei:Permafrost_Tauen.jpg, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2020, Permafrostboden): Permafrostboden als Kohlenstoffdioxidquelle in den Wintermonaten, Karte zur Freisetzung für den Zeitraum 2003-2017, aktualisiert 18.02.2020, https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Datei:Permafrost_kohlenstofffreisetzung_nasa_eo.jpg, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2024, Permafrost Landscape): Permafrostlandschaft mit wichtigen Komponenten (Temperatur, Eis und Kohlenstoff) und Prozessen (Auftauen von Eis, Abfluss, Seenbildung, Hangrutschungen, Feuer), aktualisiert 28.01.2024, https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Datei:Permafrost_landscape_sm.jpg, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2024, Antarktischer Eisschild): Antarktischer Eisschild, aktualisiert 19.10.2024, https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Antarktischer_Eisschild, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2025, Klimasystem): Klimasystem, aktualisiert 31.07.2025, <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimasystem>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2025, Grönländischer Eisschild): Grönländischer Eisschild, aktualisiert 27.08.2025, https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Gr%C3%B6nl%C3%A4ndischer_Eisschild, zuletzt abgerufen am 28.08.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2025, Meereis): Arktisches Meereis, aktualisiert 03.09.2025, https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Arktisches_Meereis, zuletzt abgerufen am 03.09.2025.
- Bildungsserver Hamburg** (2025, Verstärkung): Arktische Verstärkung, veröffentlicht 2025, <https://bildungsserver.hamburg.de/themenschwerpunkte/klimawandel-und-klimafolgen/klimawandel/regionale-klimaenderungen/arktische-verstaerkung-747264>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Black Jaguar Foundation** (2025, Project): The Project, veröffentlicht 2025, <https://www.black-jaguar.org/the-project/>, zuletzt abgerufen am 20.08.2025.
- Bloomberg** (2025, Dream): Is the World's Green Hydrogen Dream Fizzling Out?, veröffentlicht 13.08.2025, <https://www.bloomberg.com/news/articles/green-hydrogen>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.

- Blyth, M./Driscoll, D.** (2025, Dekarbonisierung): Trumps globaler Krieg gegen die Dekarbonisierung, veröffentlicht 21.08.2025, <https://www.project-syndicate.org/commentary/trump-global-war-on-decarbonization-green-technologies-by-mark-blyth-and-daniel-driscoll-2025-08/german>, zuletzt abgerufen am 26.08.2025.
- bpb** (2024, Finanzkrise): Die Finanzkrise von 2007/2008 und ihre Folgen, veröffentlicht 21.02.2024, <https://www.bpb.de/themen/wirtschaft/finanzwirtschaft/524122/die-finanzkrise-von-2007-2008-und-ihre-folgen/>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- bpb** (2024, Ergebnisse): COP29: Ergebnisse der Weltklimakonferenz in Baku, veröffentlicht 27.11.2024, <https://www.bpb.de/kurz-knapp/hintergrund-aktuell/556173/cop29-ergebnisse-der-weltklimakonferenz-in-baku/>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteo Schweiz** (2025, Albedo): Albedo, veröffentlicht 2025, <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/albedo.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Carbon Brief** (2025, Window): Tipping Points: Window to Avoid Irreversible Climate Impacts Is 'Rapidly Closing', veröffentlicht 08.07.2025, <https://www.carbonbrief.org/tipping-points-window-to-avoid-irreversible-climate-impacts-is-rapidly-closing/>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- CATF** (2024, Methane): Accelerating Climate Solutions in Agriculture: Why Reducing Methane from Livestock Is an Urgent Opportunity, veröffentlicht 08.10.2024, <https://www.catf.us/2024/10/accelerating-climate-solutions-agriculture-why-reducing-methane-livestock-urgent-opportunity/>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- Climate Action Tracker** (2024, Crisis): As the Climate Crisis Worsens, the Warming Outlook Stagnates, veröffentlicht 14.11.2024, <https://climateactiontracker.org/publications/the-climate-crisis-worsens-the-warming-outlook-stagnates/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- Climate Action Tracker** (2025, Thermometer): CAT Thermometer, zuletzt aktualisiert 11.2024, <https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- Climate Analytics** (2024, Klimasystem): Kipppunkte und kaskadische Kipodynamiken im Klimasystem, veröffentlicht 31.01.2024, <https://climateanalytics.org/publications/kipppunkte-und-kaskadische-kipodynamiken-im-klimasystem>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Climate Change Tracker** (2025, Emissions): Human-Induced Greenhouse Gas Emissions, veröffentlicht 2025, <https://climatechangetracker.org/igcc/yearly-human-induced-greenhouse-gas-emissions-in-co2-equivalent>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Climate Change Tracker** (2025, Indicators): Indicators of Global Climate Change, veröffentlicht 2025, <https://climatechangetracker.org/igcc>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Climate Change Tracker** (2025, Methane): Atmospheric CH₄ and Human-Induced Emissions, veröffentlicht 2025, <https://climatechangetracker.org/methane>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- Climate Reanalyzer** (2025, Temperature): Daily Sea Surface Temperature (World), Climate Change Institute, University of Maine, https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2, veröffentlicht 28.08.2025, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Climate State** (2014, Spiral): Arctic Sea Ice Spiral 1979-2013 (Sea Ice Decline/Deglaciation), veröffentlicht 26.01.2014, <https://climastate.com/2014/01/26/arctic-death-spiral-1979-2013-sea-ice-decline-deglaciation/>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Climeworks** (2025, Capture): Direct Air Capture: Our Carbon Removal Technology to Capture CO₂, veröffentlicht 2025, <https://climeworks.com/direct-air-capture>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Copernicus** (2025, Meereis): Ausmaß des arktischen Meereises, veröffentlicht 2025, <https://marine.copernicus.eu/de/ocean-climate-portal/arctic-sea-ice-extent>, zuletzt abgerufen am 28.08.2025.
- Curry, J.** (2019, Hurricanes): Hurricanes and Climate Change: Attribution, veröffentlicht 20.02.2019, <https://judithcurry.com/2019/02/20/24737/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Deutsche Stiftung Meeresschutz** (2021, Korallenbleiche): Was ist eine Korallenbleiche?, veröffentlicht 06.02.2021, <https://www.stiftung-meeresschutz.org/themen/klimawandel/korallenbleiche-korallen-verhungern/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Deutschlandfunk** (2025, Einspeicherung): Weltweit erste Anlage zur kommerziellen CO₂-Einspeicherung im Meeresboden in Betrieb, veröffentlicht 26.08.2025, <https://www.deutschlandfunk.de/weltweit-erste-anlage-zur-kommerziellen-co2-einspeicherung-im-meeresboden-in-betrieb-100.html>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Deutschlandfunk Kultur** (2022, Alaska): Alaska taut auf, veröffentlicht 25.10.2022, <https://www.deutschlandfunkkultur.de/usa-alaska-klimakrise-klimawandel-100.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- DKK** (2018, Nordhaus): Wofür Klima-Ökonom Nordhaus den Wirtschafts-Nobelpreis erhält, Editorial von Dr. Wilfried Rickels, Institut für Weltwirtschaft, veröffentlicht 15.11.2018, <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/news/wofuer-klima-oekonom-nordhaus-den-wirtschafts-nobelpreis-erhaelt/>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- DKRZ** (2025, Klimaforschung): Klimaforschung und Supercomputer, veröffentlicht 2025, <https://www.dkrz.de/de/about/aufgaben/hpc>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- DW** (2019, Methan): Methan: Der böse Zwillingbruder von CO₂, veröffentlicht 21.10.2019, <https://www.dw.com/de/methan-der-b%C3%B6se-zwillingsbruder-von-co2/a-49208882>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- DW** (2023, Korallensterben): Korallensterben: Was ist das Problem?, veröffentlicht 28.02.2023, <https://www.dw.com/de/warum-das-korallensterben-ein-problem-ist/a-64470088>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- DW** (2025, Gletscher): Wie schmelzende Gletscher die Welt verändern, veröffentlicht 29.05.2025, <https://www.dw.com/de/angst-vor-gletscherschmelze-gletscher-schweiz-blatten-wallis-duschanbe-un-gletscherkonferenz/a-72714654>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- DW** (2025, Südpol): Faktencheck: Widerlegt mehr Eis am Südpol den Klimawandel?, veröffentlicht 06.07.2025, <https://www.dw.com/de/faktencheck-widerlegt-mehr-eis-am-s%C3%BCdpol-den-klimawandel/a-73102849>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.

- DWD** (o.A., El Niño): El Niño und La Niña, veröffentlicht o.A., <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=100732&lv2=100652>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- DWD** (2025, Intensivierung): Intensivierung der Folgen des Klimawandels in Deutschland erfordert erweiterte Kommunikation, veröffentlicht 01.04.2025, https://www.dwd.de/DE/leistungen/faktenpapier_extremwetter/neue-methode-klimatrends.html, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- DWD** (2025, Klimapressekonferenz): Klimapressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes, veröffentlicht 01.04.2025, https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2025/20250401_pressemitteilung_klima-pk_news.html, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Eichenberger, R./Stadelmann, D.** (2025, Debatte): zitiert nach: NZZ (2025, Klimawandel): Der Klimawandel galt kürzlich noch als „größte Herausforderung der Menschheitsgeschichte“. Vom Aufstieg und Niedergang einer Debatte, veröffentlicht 13.08.2025, <https://www.nzz.ch/feuilleton/der-klimawandel-galt-kuerzlich-noch-als-groesste-herausforderung-der-menschheitsgeschichte-vom-aufstieg-und-niedergang-einer-debatte-id.1897392>, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.
- Encore** (2025, Risks): Exploring Natural Capital Opportunities, Risks and Exposure, veröffentlicht 2025, <https://www.encorenature.org/en>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- Euronews** (2025, Gletscher): Können Gletscher wieder wachsen, wenn globale Erwärmung gebremst wird?, veröffentlicht 20.05.2025, <https://de.euronews.com/green/2025/05/20/konnen-gletscher-wieder-wachsen-wenn-globale-erwärmung-gebremst-wird>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- ESA** (2025, Beobachtungsplatz): Exklusiver Beobachtungsplatz für Astronomen, veröffentlicht 2025, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Exklusiver_Beobachtungsplatz_fuer_Astronomen, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- ESKP** (2017, Korallenbleiche): Korallenbleiche vor Australien, veröffentlicht 15.05.2017, <https://www.eskp.de/en/climate-change/korallenbleiche-vor-australien-935795/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- ESKP** (2017, Permafrost): Permafrost tiefer aufgetaut als gedacht, veröffentlicht 05.2017, <https://www.eskp.de/klimawandel/permafrost-tiefer-aufgetaut-als-gedacht-935938/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- ESKP** (2019, Jetstream): Wie beeinflusst der Klimawandel den Jetstream?, veröffentlicht 25.10.2019, <https://www.eskp.de/klimawandel/wie-beeinflusst-der-klimawandel-den-jetstream-9351059/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- ESKP** (2021, Permafrost): Fragen und Antworten zum Permafrost, zuletzt aktualisiert 15.02.2021, <https://www.eskp.de/grundlagen/klimawandel/fragen-und-antworten-zum-permafrost-935726/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- ESKP** (2021, Permafrostregionen): Permafrostregionen, zuletzt aktualisiert 15.02.2021, <https://www.eskp.de/grundlagen/klimawandel/permafrostregionen-935652/>, zuletzt abgerufen am 30.08.2025
- ESKP** (2021, Zusammenhang): Zusammenhang zwischen Klimawandel und Permafrost, zuletzt aktualisiert 15.02.2021, <https://www.eskp.de/klimawandel/zusammenhang-zwischen-klimawandel-und-permafrost-93591/>, zuletzt abgerufen am 30.08.2025.
- EU-Kommission** (2024, Finanzstabilität): Bericht der Kommission über die Überwachung klimabezogener Risiken für die Finanzstabilität, veröffentlicht 28.06.2024, https://finance.ec.europa.eu/document/download/9e2c0695-9da6-4b09-ae43-78729fc7609e_de?filename=240701-climate-risks-report_de.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- EU-Kommission** (2025, Hydrogen): Hydrogen, veröffentlicht 2025, https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen_en, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- EZB** (2025, Transitionsrisiken): EZB beschließt Anpassungen am Sicherheitsrahmen zur Berücksichtigung klimabezogener Transitionsrisiken, veröffentlicht 29.07.2025, https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2025/html/ecb.pr250729_1~02d753a029.de.html, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- FERI Cognitive Finance Institute** (2024, Energiehunger): Visual – KI-Boom lässt Energienachfrage in den USA massiv steigen, veröffentlicht 16.12.2024, https://www.feri-institut.de/media/xprpwpn2/fci_2024_dezember-visual-im-fokus.pdf, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Focus** (2025, Atlantikstrom): Europa drohen kältere Temperaturen: Das passiert, wenn der Atlantikstrom schwächelt, veröffentlicht 19.06.2025, https://www.focus.de/earth/europa-drohen-kaelttere-temperaturen-was-passiert-wenn-der-atlantikstrom-schwaechelt_e6036242-f344-411d-a94f-f616d6d0cbd9.html, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Focus** (2025, Atlantik-Strömung): Atlantik-Strömung vor dem Kollaps? Neue Trends machen Forschern Hoffnung, veröffentlicht 04.07.2025, https://www.focus.de/earth/atlantik-stroemung-vor-dem-kollaps-neue-trends-machen-forschern-hoffnung_d8f2871c-c570-4abc-9eeb-2ffc11588b42.html, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- For Tomorrow** (2024, Kippelemente): Was sind die 16 Kippelemente beim Klimawandel?, aktualisiert 20.02.2024, <https://www.fortomorrow.eu/de/blog/kippelement-klima>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- FR** (2024, Eiszeit): Forschende entdecken alarmierende Veränderungen im Golfstrom: Eiszeit für Europa möglich, veröffentlicht 20.03.2024, https://www.fr.de/politik/europa-kippunkte-golfstrom-neue-studie-neue-eiszeit-in-92835047.html#google_vignette, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Fund The Planet** (2023, Amazonas-Regenwald): Die Bedeutung des Amazonas-Regenwaldes für die Klimaregulierung, veröffentlicht 31.03.2023, <https://blog.fundtheplanet.net/de/regenwaldschutz/die-bedeutung-des-amazonas-regenwaldes-fuer-klimaregulierung-alles-was-man-wissen-muss/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- GEO** (2024, El Niño): El Niño: Wie das Klimaphänomen entsteht – und welche Folgen es für uns hat, veröffentlicht 16.07.2024, <https://www.geo.de/wissen/el-ni%C3%B1o--wie-das-phaenomen-entsteht-und-mit-welchen-folgen-34267212.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.

- GEOMAR** (2019, Vulkane): Außertropische Vulkane beeinflussen das Klima stärker als vermutet, veröffentlicht 28.01.2019, <https://www.geomar.de/news/article/ausser-tropische-vulkane-beeinflussen-das-klima-staerker-als-vermutet>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- GEOMAR** (2022, Strömungssystem): Neue Erkenntnisse zu Schwankungen im Atlantischen Strömungssystem, veröffentlicht 01.03.2022, <https://www.geomar.de/news/article/neue-erkenntnisse-zu-schwankungen-im-atlantischen-stroemungssystem>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- GEOMAR** (2025, Klimasystem): Das Klimasystem der Erde, veröffentlicht 2025, <https://www.geomar.de/entdecken/ozean-und-klima/das-klimasystem-der-erde>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- GEOMAR** (2025, Meeresströmungen): Antrieb des Klimas – die großen Meeresströmungen, veröffentlicht 2025, <https://www.geomar.de/entdecken/ozean-und-klima/exkurse/meeresstroemungen>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Germanwatch** (o.A., Arktis): Das Eis in der Arktis schmilzt schneller als vermutet, veröffentlicht o.A., <https://www.germanwatch.org/de/5664>, zuletzt abgerufen 03.08.2025.
- Germanwatch** (o.A., Austrocknung): Austrocknung und „Umkippen“ des Amazonas-Regenwaldes, veröffentlicht o.A., <https://www.germanwatch.org/de/1697>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- Germanwatch** (2023, Amazonas-Regenwald): Amazonas-Regenwald: Welche Auswirkungen hat das Überschreiten des Kippunkts auf die menschliche Sicherheit?, veröffentlicht 16.02.2023, <https://www.germanwatch.org/de/blog/amazonas-regenwald-welche-auswirkungen-hat-das-ueberschreiten-des-kippunkts-auf-die>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Germanwatch** (2023, Korallenriffe): Korallenriffe könnten noch in diesem Jahrzehnt ihren Kippunkt überschreiten, veröffentlicht 16.02.2023, <https://www.germanwatch.org/de/blog/korallenriffe-koennten-noch-diesem-jahrzehnt-ihren-kippunkt-ueberschreiten>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- GFZ** (o.A., Kryosphäre): Die Kryosphäre im Klima der Erde, veröffentlicht o.A., <https://www.gfz.de/sektion/erdsystem-modellierung/themen/dynamik-der-eisschilde/die-kryosphaere-im-klima-der-erde>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- GFZ** (2018, Permafrost): Tauender Permafrost produziert mehr Methan als erwartet, veröffentlicht 19.03.2018, <https://www.gfz.de/presse/meldungen/detailansicht/tauender-permafrost-produziert-mehr-methan-als-erwartet>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Global Water Storage** (2025, Eismassenverlust): Eismassenverlust in Grönland, hrsg. von GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung, veröffentlicht 2024/2025, <https://www.globalwaterstorage.info/medien/bild-des-monats/dezember-2024>, zuletzt abgerufen am 28.08.2025.
- Goethe-Universität Frankfurt** (2024, Kipp-Risiken): Neue Studie: Kipp-Risiken einer Überschreitung von 1,5°C können durch rasche Umkehrung der Erwärmung minimiert werden, veröffentlicht 01.08.2024, <https://aktuelles.uni-frankfurt.de/forschung/neue-studie-kipp-risiken-einer-ueberschreitung-von-15-c-koennen-durch-rasche-umkehrung-der-erwaermung-minimiert-werden/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- GRID-Arendal** (2015, Himalaya): The Hindu Kush Himalayan Region, veröffentlicht 2015, <https://www.grida.no/resources/6699>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Guardian** (2025, „Evil Twin“): How the „Evil Twin“ of the Climate Crisis Is Threatening Our Oceans, veröffentlicht 09.06.2025, <https://www.theguardian.com/environment/2025/jun/09/the-scientists-warning-the-world-about-ocean-acidification-evil-twin-of-the-climate-crisis>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Guardian** (2025, Timebomb): „Ticking Timebomb“: Sea Acidity Has Reached Critical Levels, Threatening Entire Ecosystems – Study, veröffentlicht 09.06.2025, <https://www.theguardian.com/environment/2025/jun/09/sea-acidity-ecosystems-ocean-acidification-planetary-health-scientists>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Guardian** (2025, Slowdown): Dramatic Slowdown in Melting of Arctic Sea Ice Surprises Scientists, veröffentlicht 20.08.2025, <https://www.theguardian.com/environment/2025/aug/20/slowdown-in-melting-of-arctic-sea-ice-surprises-scientists>, zuletzt abgerufen am 28.08.2025.
- Handelsblatt** (2025, Scheitern): Wirtschaft warnt vor Scheitern des Wasserstoffhochlaufs, veröffentlicht 17.06.2025, <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/klimaneutralitaet-wirtschaft-warnt-vor-scheitern-des-wasserstoffhochlaufs/100135576.html>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Helmholtz** (2021, Jahre): „Die nächsten zehn Jahre sind entscheidend“, veröffentlicht 11.01.2021, <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/die-naechsten-zehn-jahre-sind-entscheidend/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Helmholtz** (2022, 1,5-Grad-Ziel): 1,5-Grad-Ziel könnte schon in den nächsten Jahren überschritten werden, veröffentlicht 23.05.2022, <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/15-grad-ziel-koennte-schon-in-den-naechsten-jahren-ueberschritten-werden/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Helmholtz-Klima** (2021, Klimawandel): Gibt es wirklich einen Klimawandel?, aktualisiert 12.2021, <https://www.helmholtz-klima.de/klimafakten/behauptung-die-gletscher-schmelzen-gar-nicht>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- IDW** (2025, Klima-Dominoeffekt): Klima-Dominoeffekt unwahrscheinlich: Neue Kippunkt-Studie gibt Hoffnung, warnt aber vor Untätigkeit, veröffentlicht 24.04.2025, <https://nachrichten.idw-online.de/2025/04/24/klima-dominoeffekt-unwahrscheinlich-neue-kippunkt-studie-gibt-hoffnung-warnt-aber-vor-untaetigkeit>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- IEA** (2023, Tripling): Tripling Renewable Power Capacity by 2030 Is Vital to Keep the 1.5°C Goal Within Reach, veröffentlicht 21.07.2023, <https://www.iea.org/commentaries/tripling-renewable-power-capacity-by-2030-is-vital-to-keep-the-150c-goal-within-reach>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- IEA** (2025, Climate Change): Climate Change, veröffentlicht 2025, <https://www.iea.org/topics/climate-change>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.

- International Science Council** (2021, Arctic): Climate Explained: Why Is the Arctic Warming Faster Than Other Parts of the World?, veröffentlicht 03.06.2021, <https://council.science/blog/climate-explained-why-is-the-arctic-warming-faster-than-other-parts-of-the-world/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- IRENA** (2025, Rekordzuwachs): Jährlicher Rekordzuwachs bei erneuerbaren Energien, veröffentlicht 26.03.2025, <https://www.irena.org/News/pressreleases/2025/Mar/Record-Breaking-Annual-Growth-in-Renewable-Power-Capacity-DE>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- IRENA** (2025, Cheaper): 91% of New Renewable Projects Now Cheaper Than Fossil Fuels Alternatives, veröffentlicht 22.07.2025, <https://www.irena.org/News/pressreleases/2025/Jul/91-Percent-of-New-Renewable-Projects-Now-Cheaper-Than-Fossil-Fuels-Alternatives>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- JUWI** (2025, Energien): Erneuerbare Energien weltweit, veröffentlicht 2025, <https://www.juwi.de/wissen/rund-um-erneuerbare/artikel/erneuerbare-energien-weltweit>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Klimafakten** (2022, Computermodelle): Fakt ist: Computermodelle können das Klimasystem Erde mittlerweile gut simulieren, zuletzt aktualisiert 11.2022, <https://www.klimafakten.de/klimawissen/fakt-ist/fakt-ist-computermodelle-koennen-das-klimasystem-erde-mittlerweile-gut>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- Klimareporter** (2024, Kippunkt): Studie findet Kippunkt der Atlantik-Strömung, veröffentlicht 14.02.2024, <https://www.klimareporter.de/klimaforschung/studie-findet-kippunkt-der-atlantik-stroemung>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Klimareporter** (2025, Atlantikströmung): Studie: Die Atlantikströmung wankt, kippt und kollabiert, veröffentlicht 28.08.2025, <https://www.klimareporter.de/erdsystem/studie-die-atlantikstroemung-wankt-kippt-und-kollabiert>, zuletzt abgerufen am 01.09.2025.
- Klimareporter** (2025, Doppelstrategie): Chinas Doppelstrategie: Erneuerbare plus Kohle, veröffentlicht 02.09.2025, <https://www.klimareporter.de/international/chinas-doppelstrategie-erneuerbare-plus-kohle>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Leibniz-Gemeinschaft** (2021, AMOC): Meeresströmung AMOC an kritischer Schwelle?, veröffentlicht 08.11.2021, <https://www.leibniz-gemeinschaft.de/en/about-us/whats-new/news/forschungsnachrichten-single/newsdetails/meeresstroemung-amoc-an-kritischer-schwelle>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- lpb** (2021, Permafrostböden): Permafrostböden, aktualisiert 10.2021, <https://www.lpb-bw.de/permafrostboeden>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Matthes, K.** (2021, Jahre): „Die nächsten zehn Jahre sind entscheidend“, zitiert nach: Helmholtz (2021, Jahre), veröffentlicht 11.01.2021, <https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/die-naechsten-zehn-jahre-sind-entscheidend/>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Max-Planck-Gesellschaft** (2024, Schmelze): Die große Schmelze, veröffentlicht 02.01.2024, <https://www.mpg.de/21320411/schmelzende-gletscher-groenland>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Max-Planck-Gesellschaft** (2024, Massenbleiche): Die vierte Massenbleiche, veröffentlicht 30.04.2024, <https://www.mpg.de/21886637/korallenbleiche>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- McCarthy, J./Odier, P.** (2025, Finanzrisiken): Naturrisiken sind Finanzrisiken, veröffentlicht 24.07.2025, <https://www.project-syndicate.org/commentary/long-term-asset-owners-integrating-nature-and-climate-risk-into-financial-assessments-by-julie-mccarthy-and-patrick-odier-2025-07/german>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- MDR** (2022, Niedrigwasser): Niedrigwasser: Die unkalkulierten Probleme der Klimafolgen, veröffentlicht 19.08.2022, <https://www.mdr.de/wissen/klima/mdr-klima-update-klima-niedrigwasser-klimafolgen-100.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- MDR** (2025, Grönland-Eisschild): Neue Daten: Grönland-Eisschild bricht immer schneller auf, veröffentlicht 03.02.2025, <https://www.mdr.de/wissen/umwelt-klima/groenland-risse-im-eisschild-wachsen-immer-schneller-100.html>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- MDR** (2025, Wärmer): In Deutschland ist es „plötzlich“ 2,5 Grad wärmer als im frühindustriellen Zeitalter, veröffentlicht 01.04.2025, <https://www.mdr.de/wissen/umwelt-klima/dwd-temperatur-deutschland-neue-trendlinie-100.html>, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- Meereisportal** (2025, Eis-Schnee-Albedo-Effekt): Meereis und Strahlungsbilanz – Einfluss von Eis auf die Albedo, veröffentlicht 2025, <https://www.meereisportal.de/wissen/meereisphysik/meereis-und-strahlungsbilanz>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- MET Office** (2024, Circulation): The Atlantic Meridional Overturning Circulation in a Changing Climate, veröffentlicht 02.05.2024, <https://www.metoffice.gov.uk/blog/2024/the-atlantic-meridional-overturning-circulation-in-a-changing-climate>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- MPI-M** (2024, Klimamodelle): Gekoppelte Klimamodelle unterschätzen systematisch den Strahlungseffekt auf die Oberflächenerwärmung, veröffentlicht 22.04.2024, <https://mpimet.mpg.de/kommunikation/detailansicht-news/gekoppelte-klimamodelle-unterschaetzen-systematisch-den-strahlungseffekt-auf-die-oberflaechenerwaermung>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- MPI-M** (2024, Klimaprojektionen): Klimaprojektionen im Kilometermaßstab dank einer neuen Generation von Modellen, veröffentlicht 10.10.2024, <https://mpimet.mpg.de/kommunikation/detailansicht-news/klimavorhersagen-im-kilometermassstab-dank-einer-neuen-generation-von-modellen>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- MPI-M** (2025, JUPITER): MPI-M gehört zu den ersten Nutzern von Europas schnellstem Rechner JUPITER, veröffentlicht 03.02.2025, <https://mpimet.mpg.de/kommunikation/detailansicht-news/mpi-m-gehört-zu-den-ersten-nutzern-von-europas-schnellstem-rechner-jupiter>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- MPI-M** (2025, Klimamodellierung): Vielfalt für die Zukunft der Klimamodellierung, veröffentlicht 12.03.2025, <https://mpimet.mpg.de/kommunikation/detailansicht-news/vielfalt-fuer-die-zukunft-der-klimamodellierung>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- MPIMP** (2015, Welthunger): Internationale Reisforscher sagen dem Welthunger den Kampf an, veröffentlicht 03.12.2015, <https://www.mpimp-golm.mpg.de/2032893/C4-Reisprojekt>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.

- Munich RE** (2025, Klimawandel): Der Klimawandel und die drastischen Folgen, aktualisiert 04.2025, <https://www.munichre.com/de/risiken/klimawandel.html>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- Munich RE** (2025, Naturkatastrophen): Naturkatastrophen weltweit: Schäden steigen, der Klimawandel schlägt zu, aktualisiert 05.2025, <https://www.munichre.com/de/risiken/naturkatastrophen.html>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- NDR** (2025, Meereis): Klimawandel: Deutlich weniger Meereis in der Arktis als sonst, veröffentlicht 05.08.2025, <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Klimawandel-So-schnell-schmilzt-das-Meereis-der-Arktis,meereis100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- NOAA** (2024, AMOC): What Is the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)?, aktualisiert 16.06.2024, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/amoc.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- NOAA** (2024, Conveyor): What Is the Global Ocean Conveyor Belt?, aktualisiert 16.06.2024, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/conveyor.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- NOAA** (2024, Belt): The Global Conveyor Belt, aktualisiert 18.07.2024, https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor2.html, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- NOAA** (2024, Circulation): Thermohaline Circulation, aktualisiert 18.07.2024, https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- NOAA** (2024, Jet Stream): The Jet Stream, aktualisiert 09.12.2024, <https://www.noaa.gov/jetstream/global/jet-stream>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- NSIDC** (2025, Charctic): Charctic Interactive Sea Ice Graph, National Snow and Ice Data Center, University of Colorado Boulder, veröffentlicht 2025, <https://nsidc.org/sea-ice-today/sea-ice-tools/charctic-interactive-sea-ice-graph>, zuletzt abgerufen am 28.08.2025.
- ntv** (2020, CO₂-Zeitbombe): Sibiriens CO₂-Zeitbombe tickt bedrohlich, veröffentlicht 16.02.2020, <https://www.n-tv.de/wissen/Sibiriens-CO2-Zeitbombe-tickt-bedrohlich-article21580208.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- ntv** (2021, Regenwald): Regenwald leidet unter Chinas Fleischlust, veröffentlicht 16.03.2021, <https://www.n-tv.de/panorama/Regenwald-leidet-unter-Chinas-Fleischlust-article22429525.html>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- ntv** (2024, Klimawandel): Können wir mit Hoffnung den Klimawandel bewältigen?, veröffentlicht 13.08.2024, <https://www.n-tv.de/panorama/Koennen-wir-mit-Hoffnung-den-Klimawandel-bewaeltigen-article25080206.html>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- ntv** (2025, Erwärmung): DWD berechnet deutlich höhere Erwärmung für Deutschland, veröffentlicht 29.06.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/DWD-berechnet-deutlich-hoehere-Erwaermung-fuer-Deutschland-article25866620.html>, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- ntv** (2025, CO₂-Zenit): Hat China den CO₂-Zenit überschritten?, veröffentlicht 13.07.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Hat-China-den-CO2-Zenit-ueberschritten-article25895583.html>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- ntv** (2025, Luft): Dieses Startup saugt CO₂ aus der Luft, veröffentlicht 29.07.2025, https://www.n-tv.de/wirtschaft/wirtschaft_startup/Dieses-Startup-saugt-CO2-aus-der-Luft-article25929042.html, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- ntv** (2025, USA): USA wollen Kampf gegen Erderwärmung beenden, veröffentlicht 29.07.2025, <https://www.n-tv.de/politik/USA-wollen-Kampf-gegen-Erderwaermung-beenden-article25933148.html>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- ntv** (2025, Gletscher): Gletscher schmelzen in diesem Jahr besonders früh, veröffentlicht 02.08.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Gletscher-schmelzen-in-diesem-Jahr-besonders-frueh-article25941200.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- ntv** (2025, Korallenbleiche): Biologen melden schwerste Korallenbleiche an Australiens Westküste, veröffentlicht 12.08.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Biologen-melden-schwerste-Korallenbleiche-an-Australiens-Westkueste-article25959432.html>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- ntv** (2025, Antarktis): Studie: Anzeichen für „abrupte“ Veränderungen in der Antarktis, veröffentlicht 20.08.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Studie-Anzeichen-fuer-abrupte-Veraenderungen-in-der-Antarktis-article25978242.html>, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- ntv** (2025, Superzellen): Gefürchtete Superzellen werden noch heftiger, veröffentlicht 28.08.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Gefuerchte-Superzellen-werden-noch-heftiger-article25994028.html>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- ntv** (2025, Eisberg): Größter Eisberg der Welt könnte bald weggeschmolzen sein, veröffentlicht 02.09.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Groesster-Eisberg-der-Welt-koennte-bald-weggeschmolzen-sein-article26005594.html>, zuletzt abgerufen am 03.09.2025.
- ntv** (2025, Klimabericht): Wissenschaftler zerpflücken „Klimabericht“ von Trumps Regierung, veröffentlicht 02.09.2025, <https://www.n-tv.de/politik/Wissenschaftler-zerpfluecken-Klimabericht-von-Trumps-Regierung-article26005517.html>, zuletzt abgerufen am 03.09.2025.
- ntv** (2025, Meeresströmung): Wichtige Meeresströmung im Pazifik bricht zusammen, veröffentlicht 02.09.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Wichtige-Meeresstroemung-im-Pazifik-bricht-zusammen-article26003615.html>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- ntv** (2025, CO₂): Viel weniger CO₂ als gedacht kann gespeichert werden, veröffentlicht 03.09.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Viel-weniger-CO2-als-gedacht-kann-gespeichert-werden-article26006440.html>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- ntv** (2025, Winter): Europas Winter drohen nach 2100 eisig zu werden, veröffentlicht 03.09.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Europas-Winter-drohen-nach-2100-eisig-zu-werden-article26007612.html>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- ntv** (2025, Organismus): Dem häufigsten Organismus der Erde wird es zu warm, veröffentlicht 08.09.2025, <https://www.n-tv.de/wissen/Haeufigster-Organismus-der-Erde-droht-extrem-zu-schwinden-Cyanobakterium-Prochlorococcus-ist-wichtiger-Sauerstoffproduzent-article26017733.html>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- NZZ** (2025, Klimawandel): Der Klimawandel galt kürzlich noch als „größte Herausforderung der Menschheitsgeschichte“. Vom Aufstieg und Niedergang einer Debatte, veröffentlicht 13.08.2025, <https://www.nzz.ch/feuilleton/der-klimawandel-galt-kuerzlich-noch-als-groesste-herausforderung-der-menschheitsgeschichte-vom-aufstieg-und-niedergang-einer-debatte-ld.1897392>, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.

- Oro Verde** (2025, Regenwald): Bedeutung des Regenwaldes. Warum er so wichtig für das Leben auf der Erde ist, veröffentlicht 2025, <https://www.regenwald-schuetzen.org/regenwald-wissen/bedeutung-des-regenwaldes>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Pflanzenforschung** (2010, Reis): Weltnahrungspflanze Reis, veröffentlicht 16.06.2010, <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/weltnahrungspflanze-reis-768>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- PIK** (2018, Abschwächung): Stärkere Belege für Abschwächung des Golfstromsystems, veröffentlicht 11.04.2018, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/staerkere-belege-fuer-abschwaechung-des-golfstromsystems>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- PIK** (2018, „Heißzeit“): Auf dem Weg in die „Heißzeit“? Planet könnte kritische Schwelle überschreiten, veröffentlicht 06.08.2018, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/auf-dem-weg-in-die-heisszeit-planet-koennte-kritische-schwelle-ueberschreiten>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- PIK** (2021, Golfstrom-System): Golfstrom-System schwächer als je zuvor im vergangenen Jahrtausend, veröffentlicht 25.02.2021, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/golfstrom-system-schwaecher-als-je-zuvor-im-vergangenen-jahrtausend>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- PIK** (2021, Klima-Domino-Effekte): Risikoanalyse von Klima-Domino-Effekten: Kippelemente können sich gegenseitig destabilisieren, veröffentlicht 03.06.2021, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/risikoanalyse-von-klima-domino-effekten-kippelemente-koennen-sich-gegenseitig-destabilisieren>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- PIK** (2022, Klima-Kippunkte): Risiko des Überschreitens mehrerer Klima-Kippunkte steigt bei einer globalen Erwärmung von mehr als 1,5°C, veröffentlicht 09.09.2022, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/risiko-des-ueberschreitens-mehrerer-klima-kippunkte-steigt-bei-einer-globalen-erwaermung-von-mehr-als-1-5degc>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- PIK** (2023, Westantarktis): Stabilitätsprüfung für die Westantarktis: Mariner Eisschild bislang nicht destabilisiert, aber möglicherweise auf dem Weg zum Kippunkt, veröffentlicht 07.09.2023, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/stabilitaetspruefung-fuer-die-westantarktis-mariner-eisschild-bislang-nicht-destabilisiert-aber-moeglicherweise-auf-dem-weg-zum-kippunkt>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- PIK** (2024, Amazonas-Regenwald): Amazonas-Regenwald auf der Kippe: Waldverlust verstärkt den Klimawandel, veröffentlicht 14.02.2024, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/amazonas-regenwald-auf-der-kippe-waldverlust-verstaerkt-den-klimawandel>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- PIK** (2024, Umwälzströmung): Überblicksartikel: Nähert sich die atlantische Umwälzströmung einem Kippunkt?, veröffentlicht 11.04.2024, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/ueberblicksartikel-die-atlantische-umwaelzstroemung-als-kippunkt>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- PIK** (2024, Schäden): 38 Billionen Dollar Schäden pro Jahr: 19 Prozent Einkommensverlust weltweit durch Klimawandel, veröffentlicht 17.04.2024, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/38-billionen-dollar-schaeden-pro-jahr-19-einkommensverlust-weltweit-durch-klimawandel>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- PIK** (2025, Wunderling): Kippelemente im Fokus: Professur für Nico Wunderling, veröffentlicht 24.04.2025, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/kippelemente-im-fokus-professur-fuer-nico-wunderling>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- PIK** (2025, Eisschild): Nächste Jahre laut Forschungsteam entscheidend für die Zukunft des westantarktischen Eisschildes, veröffentlicht 03.06.2025, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/naechste-jahre-laut-forschungsteam-entscheidend-fuer-die-zukunft-des-westantarktischen-eisschildes>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- PIK** (2025, Klimaschäden): Nature-Studie zu Klimaschäden überarbeitet, veröffentlicht 06.08.2025, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/nature-studie-zu-klimaschaeden-ueberarbeitet>, zuletzt abgerufen am 15.09.2025.
- PIK** (2025, Erdsystem): Kippelemente – Großrisiken im Erdsystem. Aktueller Forschungsstand: Kippelemente, veröffentlicht 2025, <https://www.pik-potsdam.de/de/produkte/infoteh/kippelemente/kippelemente>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- PIK** (2025, Erdsystemanalyse): Erdsystemanalyse – Ozeane, Atmosphäre und Biosphäre in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, veröffentlicht 2025, <https://www.pik-potsdam.de/de/institut/abteilungen/erdsystemanalyse/rd1-erdsystemanalyse>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- PIK** (2025, Kippelemente): Was sind Kippelemente?, veröffentlicht 2025, <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/fragen/was-sind-kippelemente>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- PIK** (2025, Publications): Stefan Rahmstorf. List of Publications, veröffentlicht 2025, <https://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- RAOnline** (2025, Report): Klima-Fakten, veröffentlicht 2025, https://www.raonline.ch/pages/edu/cli4/gloccli_reports02a000c.html, zuletzt abgerufen am 11.09.2025.
- RND** (2022, Kippunkte): Fünf Kippunkte, die den Klimawandel beschleunigen – und die Welt für immer verändern könnten, veröffentlicht 17.01.2022, <https://www.rnd.de/wissen/klimawandel-fuenf-kippunkte-die-die-welt-fuer-immer-veraendern-koennen-NJHZX4RTRCETOGNLDWYMKV5E.html>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Science** (2023, Permafrost): Klima-Glossar: Permafrost, veröffentlicht 09.01.2023, <https://science.apa.at/power-search/17725118663896922928>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Science Media Center** (2020, Grönlandeis): Situation des Grönlandeis und seine Rolle in Klimaprozess, veröffentlicht 27.08.2020, <https://www.sciencemediacenter.de/angebote/situation-des-groenlandeis-und-seine-rolle-in-klimaprozess-20140>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.

- Science Media Center** (2023, Westantarktis): Schelfeis in wichtiger Region der Westantarktis schmilzt in allen Szenarien, veröffentlicht 23.10.2023, <https://sciencemediacenter.de/angebote/schelfeis-in-wichtiger-region-der-westantarktis-schmilzt-in-allen-szenarien-23175>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Science Media Center** (2025, Permafrost): Studie: Tauender Permafrost als langfristige Kohlenstoffquelle – selbst bei negativen Emissionen? veröffentlicht 12.02.2025, <https://www.sciencemediacenter.de/angebote/studie-tauender-permafrost-als-langfristige-kohlenstoffquelle-selbst-bei-negativen-emissionen-25030>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- scinexx.de** (2011, Permafrost): Permafrost gibt fünf Mal mehr Treibhausgase ab als gedacht, veröffentlicht 01.12.2011, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/permafrost-gibt-fuenf-mal-mehr-treibhausgase-ab-als-gedacht/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- scinexx.de** (2014, Klima): Klima: CO₂ braucht zehn Jahre, veröffentlicht 03.12.2014, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/klima-co2-braucht-zehn-jahre/>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- scinexx.de** (2018, Eisverlust): Grönland: Eisverlust wächst exponentiell. Eisschild reagiert immer sensibler auf Temperaturveränderungen, veröffentlicht 06.12.2018, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/groenland-eisverlust-waechst-exponentiell/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- scinexx.de** (2020, Rekordschmelze): Grönland: Rekordschmelze im Jahr 2019. Ungewöhnlich stabiles Hochdruckgebiet blockierte Schneefall und förderte das Abtauen, veröffentlicht 16.04.2020, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/groenland-rekordschmelze-im-jahr-2019/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- scinexx.de** (2020, Prognosen): Grönland: Schmelze überholt Prognosen. Pegelanstieg durch Grönlands Gletscher erreicht schon jetzt fast die Werte für 2100, veröffentlicht 18.11.2020, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/groenland-schmelze-ueberholt-prognosen/>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- scinexx.de** (2021, Kippunkt): Grönlandeis: Kurz vor dem Kippunkt? Teile des Eisschildes zeigen Frühwarnzeichen für eine Destabilisierung, veröffentlicht 18.05.2021, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/groenlandeis-kurz-vor-dem-kippunkt/>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- scinexx.de** (2025, Weltklima): Der Einfluss von CO₂ auf das Weltklima, veröffentlicht 10.04.2025, <https://www.scinexx.de/businessnews/der-einfluss-von-co2-auf-das-weltklima/>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- SCNAT** (2023, Klimawirkung): Fragen und Antworten zur Klimawirkung von Methan, veröffentlicht 30.11.2023, https://scnat.ch/de/uuid/i/9bfeff23-d97b-5304-9b89-2e8d94227a76-Fragen_und_Antworten_zur_Klimawirkung_von_Methan, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- SCNAT** (2025, Permafrost): Permafrost in den Schweizer Alpen: 2024 war ein weiteres Rekordjahr, veröffentlicht 17.06.2025, https://scnat.ch/de/uuid/i/f3abf5de-3e30-596d-861e-35f19699c1cf-Permafrost_in_den_Schweizer_Alpen_2024_war_ein_weiteres_Rekordjahr, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- SFI** (2024, Complexity): Office of Applied Complexity, veröffentlicht 2024, <https://www.santafe.edu/applied-complexity/office>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Spektrum** (2010, Alpengletscher): Atlantik beeinflusst Alpengletscher, veröffentlicht 08.06.2010, <https://www.spektrum.de/news/atlantik-beeinflusst-alpengletscher/1035501>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Spektrum** (2011, Amazonas): Amazonas besitzt mächtigen Zwillings im Untergrund, veröffentlicht 26.08.2011, <https://www.spektrum.de/news/amazonas-besitzt-maechtigen-zwilling-im-untergrund/1121512>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Spektrum** (2024, Korallenbleiche): Größte jemals beobachtete Korallenbleiche steht bevor, veröffentlicht 16.04.2024, <https://www.spektrum.de/news/groesste-jemals-beobachtete-korallenbleiche-steht-bevor/2214113>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Spektrum** (2024, Weltuntergangs-Gletscher): Die Zukunft des Weltuntergangs-Gletschers sieht düster aus, veröffentlicht 20.09.2024, <https://www.spektrum.de/news/antarktis-die-zukunft-des-weltuntergangs-gletschers-sieht-duester-aus/2233521>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Spiegel** (2022, Arktis): Erwärmung in der Arktis fast viermal schneller als weltweit, veröffentlicht 12.08.2022, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/klimawandel-erwaermung-in-arktis-fast-viermal-schneller-als-weltweit-a-454be6e1-8a3a-4ffe-ad3c-13a684206822>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Spiegel** (2025, AMOC): Alarm um AMOC, veröffentlicht 29.08.2025, <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/atlantische-umwaelzzirkulation-klimamodelle-zeigen-hohes-risiko-von-kollaps-a-65c62fd-d44b-4432-b1e2-a9cb2b49132a>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- Standard** (2023, Meereis): Arktisches Meereis könnte schon in zehn Jahren saisonal verschwinden, veröffentlicht 06.06.2023, <https://www.derstandard.at/story/3000000173549/arktisches-meereis-koennte-schon-in-zehn-jahren-saisonal-verschwinden>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Standard** (2024, Arktis): Arktis könnte ab 2035 im September eisfrei sein, veröffentlicht 05.03.2024, <https://www.derstandard.de/story/3000000210264/arktis-koennte-ab-2035-im-september-eisfrei-sein>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Statista** (2024, Treibhausgasemissionen): Woher kommen die Treibhausgas-Emissionen?, veröffentlicht 25.10.2024, <https://de.statista.com/infografik/33333/weltweite-treibhausgasemissionen-nach-sektor/>, zuletzt abgerufen 26.08.2025.
- Statista** (2024, Reis): Reis – Baustein der Welternährung, veröffentlicht 28.11.2024, <https://de.statista.com/themen/12820/reis/#topicOverview>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Statista** (2025, Regenwaldfläche): Verlust der globalen tropischen Regenwaldfläche im Zeitraum 2002 bis 2024, veröffentlicht 05.2025, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1184901/umfrage/verlust-der-globalen-regenwaldflaeche/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Statista** (2025, Elektroautos): Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos weltweit von 2012 bis 2023, veröffentlicht 20.06.2025, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/406683/umfrage/anzahl-der-verkaeufe-von-elektroautos-weltweit-prognose/>, zuletzt abgerufen am 19.08.2025.

- Statista** (2025, China): Investitionen in grüne Energie: China bleibt unerreicht, veröffentlicht 24.06.2025, <https://de.statista.com/infografik/34672/weltweite-investitionen-in-erneuerbare-energien-nach-land-und-region/>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Statista** (2025, Ozeane): Tägliche mittlere Oberflächentemperatur der Ozeane (SST) im Mittel der Jahre 1991 bis 2020 sowie in den Jahren 2022 bis 2025, veröffentlicht 07.07.2025, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1387104/umfrage/ozeane-mittlere-temperatur/>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- SWR** (2025, Treibhaus): Klimawandel – Treibhaus Erde, veröffentlicht 10.05.2025, <https://www.planet-schule.de/schwerpunkt/klimawandel/treibhaus-erde-film-100.html>, zuletzt abgerufen am 19.09.2025.
- SWR** (2025, Wirbelstürme): Hurrikans: So verändert der Klimawandel tropische Wirbelstürme, veröffentlicht 04.06.2025, <https://www.swr.de/swrkultur/wissen/hurrikans-so-veraendert-der-klimawandel-tropische-wirbelstuerme-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- SZ** (2025, Korallen): Immer mehr Korallen sterben endgültig, veröffentlicht 29.04.2025, <https://www.sueddeutsche.de/projekte/artikel/wissen/korallenriffe-korallenbleiche-rekordhoehe-e093201/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Tagesschau** (2021, Hitzerekord): Hitzerekord in der Arktis bestätigt, veröffentlicht 14.12.2021, <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/arktis-hitzerekord-101.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Tagesschau** (2023, Niedrigwasser): Niedrigwasser im Rhein gefährdet die Konjunktur, veröffentlicht 20.06.2023, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/niedrigwasser-rhein-konjunktur-100.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Tagesschau** (2023, Wetterphänomen): El Niño wird wohl zweite Jahreshälfte bestimmen, veröffentlicht 04.07.2023, <https://www.tagesschau.de/wetter/wetterthema/wetterphaenomen-el-nino-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Tagesschau** (2024, CO₂-Problem): Norwegen will das CO₂-Problem unterirdisch lösen, veröffentlicht 09.09.2024, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/co2-speicherung-beispiel-kritik-100.html>, zuletzt abgerufen 15.08.2025.
- Tagesschau** (2024, China): China baut erneuerbare Energien massiv aus (Video), veröffentlicht 14.11.2024, <https://www.tagesschau.de/video/video-1401530.html>, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.
- Tagesschau** (2024, Scheitern): „Nicht nur ein Scheitern, sondern Betrug“, veröffentlicht 24.11.2024, <https://www.tagesschau.de/ausland/baku-cop29-reaktionen-100.html>, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.
- Tagesschau** (2025, Meerestemperaturen): Meerestemperaturen steigen schneller, veröffentlicht 31.01.2025, <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/anstieg-temperaturen-meere-klimawandel-100.html>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Tagesschau** (2025, Arktis): Wie das Schmelzen der Arktis unser Wetter beeinflusst, veröffentlicht 03.02.2025, <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/klimawandel-arktis-wetter-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Tagesschau** (2025, Ozeane): Ozeane auch in der Tiefe so warm wie nie, veröffentlicht 13.03.2025, <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/meere-temperatur-100.html>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Tagesschau** (2025, Gletschersturz): Bröckelnder Berg löst Gletschersturz aus, veröffentlicht 28.05.2025, <https://www.tagesschau.de/ausland/europa/gletschersturz-schweiz-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Tagesschau** (2025, Sonne): Das riskante Unternehmen, die Sonne zu verdunkeln, veröffentlicht 11.08.2025, <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/sonne-verdunkeln-100.html>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Tagesschau** (2025, Kippunkt): Sorgt der Klimawandel dafür, dass es bei uns kühler wird?, veröffentlicht 28.08.2025, <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/klimawandel-kollabiert-der-golfstrom-100.html>, zuletzt abgerufen 29.08.2025.
- Tagesschau** (2025, Extremwetter): Extremwetter kostet Volkswirtschaften viele Milliarden, veröffentlicht 15.09.2025, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/kosten-extremwetter-eu-100.html>, zuletzt abgerufen am 16.09.2025.
- Tagesspiegel** (2025, CO₂-Speicherung): Bundesregierung will CO₂-Speicherung erlauben: Klimaschutz-Durchbruch oder Freifahrtschein für die fossile Lobby?, veröffentlicht 06.08.2025, <https://www.tagesspiegel.de/politik/bundesregierung-will-co2-speicherung-erlauben-klimaschutz-durchbruch-oder-freifahrtschein-fur-die-fossile-lobby-14141747.html>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Tagesspiegel** (2025, Arktis): Liegt die Klimaforschung falsch?: Schwund des Meereises in der Arktis legt Pause ein, veröffentlicht 25.08.2025, <https://www.tagesspiegel.de/wissen/liegt-die-klimaforschung-falsch-schwund-des-meereises-in-der-arktis-legt-pause-ein-14208260.html>, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- Thallinger, G.** (2025, Capitalism): Climate, Risk, Insurance: The Future of Capitalism, veröffentlicht bei LinkedIn am 25.03.2025, <https://www.linkedin.com/pulse/climate-risk-insurance-future-capitalism-g%C3%BCnther-thallinger-smw5f>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- The Conversation** (2018, Hothouse): Hothouse Earth: Here’s What the Science Actually Does – and Doesn’t – Say, veröffentlicht 09.08.2018, <https://theconversation.com/hothouse-earth-heres-what-the-science-actually-does-and-doesnt-say-101341>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- The Conversation** (2024, Atlantic): Atlantic Ocean Is Headed for a Tipping Point – Once Melting Glaciers Shut down the Gulf Stream, We Would See Extreme Climate Change within Decades, Study Shows, veröffentlicht 09.02.2024, <https://theconversation.com/atlantic-ocean-is-headed-for-a-tipping-point-once-melting-glaciers-shut-down-the-gulf-stream-we-would-see-extreme-climate-change-within-decades-study-shows-222834>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- The Conversation** (2025, 3 Years): Only 3 Years Left – New Study Warns the World Is Running out of Time to Avoid the Worst Impacts of Climate Change, veröffentlicht 20.07.2025, <https://theconversation.com/only-3-years-left-new-study-warns-the-world-is-running-out-of-time-to-avoid-the-worst-impacts-of-climate-change-261229>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2006, Permafrost): Klimagefahr durch tauenden Permafrost?, veröffentlicht 08.2006, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/357/dokumente/klimagefahr_durch_tauenden_permafrost.pdf, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.

- Umweltbundesamt** (2024, Ozeanversauerung): Meere unter Druck – Ozeanversauerung durch CO₂, veröffentlicht 01.03.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/meere/nutzung-belastungen/meere-unter-druck-ozeanversauerung-durch-co2#ozeane-kohlenstoffdioxid-speicher->, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2024, Lösungen): Naturbasierte Lösungen für den Klima- und Biodiversitätsschutz, veröffentlicht 07.06.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/naturbasierte-loesungen-fuer-den-klima#was-konkret-sind-naturbasierte-losungen>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2024, COP 29): Ergebnisse der COP29: Kleine Schritte, große Ziele, veröffentlicht 05.12.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/ergebnisse-der-cop29-kleine-schritte-grosse-ziele>, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2025, Klimaänderungen): Beobachtete und künftig zu erwartende globale Klimaänderungen, veröffentlicht 30.05.2025, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/beobachtete-kuenftig-zu-erwartende-globale#aktueller-stand-der-klimaforschung->, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- Umweltbundesamt** (2025, Geoengineering): Geoengineering, veröffentlicht 29.07.2025, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-klimapolitik/geoengineering#srm>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- UN** (2024, Climate Hell): There Is an Exit Off ,the Highway to Climate Hell', Guterres Insists, veröffentlicht 05.06.2024, <https://news.un.org/en/story/2024/06/1150661>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- UN** (2025, Climate): UN Climate Change Conference – Belém, November 2025, veröffentlicht 2025, <https://unfccc.int/cop30>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- UN** (2025, Glaciers): 2025 International Year of Glaciers' Preservation, veröffentlicht 2025, <https://www.un-glaciers.org/en>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Universität Hamburg** (2025, Arktis): Arktis im Jahr 2100 kaum noch wiedererkennbar, veröffentlicht 07.02.2025, <https://www.uni-hamburg.de/newsroom/presse/2025/pm5.html>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Universität Hamburg CLICCS** (2023, Methan): Wie viel Methan in der Tundra freigesetzt wird, veröffentlicht 07.09.2023, <https://www.cliccs.uni-hamburg.de/de/about-cliccs/news/2023-news/2023-09-06-methane-quarterly.html>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Universität Mannheim** (2025, Wetterereignisse): Extreme Wetterereignisse im Sommer 2025: Europa drohen längerfristig 126 Milliarden Euro Verlust, veröffentlicht 15.09.2025, <https://www.uni-mannheim.de/newsroom/presse/pressemitteilungen/2025/september/extremwetterereignisse/>, zuletzt abgerufen am 16.09.2025.
- University of Exeter** (2025, Dashboard): Planetary Solvency Dashboard; Global Tipping Points zusammen mit Institute and Faculty of Actuaries (IFoA), veröffentlicht 2025 (vorläufige Demo-Version), <https://global-tipping-points.org/risk-dashboard/>, zuletzt abgerufen am 05.09.2025.
- University of Exeter** (2025, Lenton): Tim Lenton, veröffentlicht 2025, <https://experts.exeter.ac.uk/19727-tim-lenton>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- University of Oxford** (2025, Lab): Resilient Planet Finance Lab: Adaptation, Resilience and Nature Finance, veröffentlicht 2025, <https://www.eci.ox.ac.uk/research/resilient-planet-finance-lab-adaptation-resilience-and-nature-finance>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- VDI** (2024, Kaskadeneffekte): Dynamische Kaskadeneffekte und Rückkopplungen: Der Dominoeffekt, veröffentlicht 25.09.2024, <https://www.vdi.de/news/detail/dynamische-kaskadeneffekte-und-rueckkopplungen-der-dominoeffekt>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- VDI Nachrichten** (2025, CO₂-Reduktion): Beton nachhaltig nutzen: So gelingt CO₂-Reduktion im Bau, veröffentlicht 02.07.2025, <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/umwelt/klimafreundliches-bauen-co2-senken/>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- Wasser und Eis** (2020, Vergleichsbilder): Schweizer Gletscher: Vergleichsbilder – Früher und heute, veröffentlicht 11.12.2020, <https://wasserundeis.com/2020/12/11/schweizer-gletscher-vergleichsbilder-fruher-und-heute/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- WCRP** (2025, CMIP): CMIP – Coupled Model Intercomparison Project, World Climate Research Project, veröffentlicht 2025, <https://wcrp-cmip.org/>, zuletzt abgerufen am 01.09.2025.
- WEF** (2025, Climate Action): Climate Action, veröffentlicht 2025, <https://www.weforum.org/stories/climate-action/>, zuletzt abgerufen am 11.08.2025.
- WEF** (2025, Capture): Carbon Capture and Storage Is at a Pivotal Moment for Decarbonization. Here's Why, veröffentlicht 05.08.2025, <https://www.weforum.org/stories/2025/08/carbon-capture-storage-decarbonization-pivotal-moment/>, zuletzt abgerufen am 24.08.2025.
- Welt der Physik** (o.A., Wirbelstürme): Erwärmung der Meere verursacht stärkere Wirbelstürme, veröffentlicht o.A., <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/nachrichten/2006/erwaermung-der-meere-verursacht-staerkere-wirbelstuerme/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Welt der Physik** (2022, Erwärmung): Erwärmung der Arktis drastisch unterschätzt, veröffentlicht 11.08.2022, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/nachrichten/2022/klimawandel-erwaermung-der-arktis-drastisch-unterschaezt/>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Welt der Physik** (2023, Permafrost): Tauender Permafrost beschleunigt Erosion, veröffentlicht 12.09.2023, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/nachrichten/2023/klimawandel-tauender-permafrost-beschleunigt-erosion/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2025.
- Wetter.de** (2024, „Superstürme“): Immer mehr „Superstürme“: Muss die Hurrikan-Skala erweitert werden?, veröffentlicht 07.02.2024, <https://www.wetter.de/cms/wirbelstuerme-werden-immer-extremer-muss-die-hurrikan-skala-erweitert-werden-5076030.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.

- Wetter Online** (2025, Bergstürze): Häufigere Bergstürze durch Klimawandel, veröffentlicht 23.05.2025, <https://www.wetteronline.ch/wetterticker/klimawandel-macht-bergstuerze-wahrscheinlicher--c1eb5388-71fd-4680-a73e-6ebc92a35d4f>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- Wetter Online** (2025, Jetstream): Jetstream, veröffentlicht 2025, <https://www.wetteronline.de/wetterlexikon/jetstream>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- WGMS** (2025, Glacier): Global Glacier State, aktualisiert 20.02.2025, <https://wgms.ch/global-glacier-state/>, zuletzt abgerufen am 06.08.2025.
- WiWo** (2025, Korallen): Riff am Limit: Great Barrier Reef verliert massiv Korallen, veröffentlicht 06.08.2025, <https://www.wiwo.de/dpa/rekordbleiche-in-australien-riff-am-limit-great-barrier-reef-verliert-massiv-korallen/30427686.html>, zuletzt abgerufen am 18.08.2025.
- World Resources Institute** (2025, Forest Loss): Fires Drove Record-breaking Tropical Forest Loss in 2024, veröffentlicht 21.05.2025, <https://gfr.wri.org/latest-analysis-deforestation-trends>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Wunderling, N.** (2025, Kippelementen): Den Kippelementen des Klimas auf der Spur, Interview, Bundesverband deutscher Stiftungen/ Klaus-Tschira-Stiftung, veröffentlicht 15.07.2025, <https://www.stiftungen.org/aktuelles/news-aus-stiftungen/detail/den-kippelementen-des-klimas-auf-der-spur-15141.html>, zuletzt abgerufen am 15.08.2025.
- ZDF heute** (2021, Klimawandel): Die Akte Klimawandel, veröffentlicht 10.11.2021, <https://zdfheute-stories-scroll.zdf.de/klimawandel-forschung-politik/index.html>, zuletzt abgerufen am 01.08.2025.
- ZDF heute** (2025, Ausstieg): Was Trumps Abkehr vom Klimaabkommen bedeutet, veröffentlicht 20.01.2025, <https://www.zdfheute.de/politik/ausland/trump-usa-pariser-klimaabkommen-ausstieg-folgen-100.html>, zuletzt abgerufen am 04.08.2025.
- ZDF heute** (2025, Niedrigwasser): Was das Niedrigwasser im Rhein bedeutet, veröffentlicht 10.04.2025, <https://www.zdfheute.de/politik/deutschland/rheinpegel-niedrigwasser-binnenschiffahrt-trockenheit-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- ZDF heute** (2025, Waldbrände): Weniger Abholzung – aber mehr Waldbrände, veröffentlicht 28.05.2025, <https://www.zdfheute.de/politik/ausland/amazonas-regenwald-brasilien-waldverlust-100.html>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Zeit** (2023, Kippunkt): Forscher sehen acht wichtige Erdsysteme vor Kippunkt, veröffentlicht 06.12.2023, <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2023-12/kipppunkte-welt-acht-bericht-erdsysteme-klimawandel>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Zeit** (2024, CO₂-Bilanz): Waldschäden verändern CO₂-Bilanz im Amazonas-Regenwald, veröffentlicht 06.08.2024, <https://www.zeit.de/news/2024-08/06/waldschaeden-veraendern-co2-bilanz-im-amazonas-regenwald>, zuletzt abgerufen am 05.08.2025.
- Zeit** (2025, Technologie): Kann diese Technologie den Klimawandel rückgängig machen?, veröffentlicht 27.08.2025, <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2025-08/co2-abscheidung-norwegen-fossile-industrie-technologie>, zuletzt abgerufen am 03.09.2025.
- Zeit** (2025, Riskant): Riskant, extrem teuer und wahrscheinlich unwirksam, veröffentlicht 09.09.2025, <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2025-09/geoengineering-artktis-antarktis-klimaschutz-forschung>, zuletzt abgerufen am 10.09.2025.
- Zeit** (2025, Antarktis): Klimakrise trifft Antarktis stärker als bisher angenommen, aktualisiert 03.10.2025, <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2025-10/klimakrise-auswirkungen-antarktis-anstieg-meeresspiegel>, zuletzt abgerufen am 08.10.2025.

KI-basierte Recherchen und Suchergebnisse

- Google Gemini** (2025, Kaskadeneffekte): Suchbegriff – Prozyklische Kaskadeneffekte, 15.07.2025.
- Perplexity** (2025, Arktis): Prompt – Arktis erwärmt sich viermal schneller, 30.07.2025.
- Perplexity** (2025, Bergrutsch): Prompt – Risiken von Bergrutsch im Alpenraum, 28.07.2025.
- Perplexity** (2025, Bergstürze): Prompt – Risiken von Bergstürzen im Alpenraum, 28.07.2025.
- Perplexity** (2025, CO₂-Entnahme): Prompt – Wieviel Prozent der CO₂-Bestände in der Luft könnten durch Climeworks entzogen werden?, 13.08.2025.
- Perplexity** (2025, Dieback): Prompt – Was ist der Amazonas Dieback?, 05.08.2025.
- Perplexity** (2025, Finanzkrise): Prompt – Große Finanzkrise als Dominoeffekt, 15.07.2025.
- Perplexity** (2025, Gletscher): Prompt – Gletscherschmelze in Alaska und Kanada, 28.07.2025.
- Perplexity** (2025, Grönlandeis): Prompt – Wie ist der aktuelle Stand beim Abschmelzen des Grönlandeises?, 22.07.2025.
- Perplexity** (2025, Jetstreams): Prompt – Was sind die Jetstreams?, 22.07.2025.
- Perplexity** (2025, Kaskadeneffekt): Prompt – Was ist ein prozyklischer Kaskadeneffekt?, 15.07.2025.
- Perplexity** (2025, Kippunkte): Prompt – Was sind die wichtigsten Klimakippunkte?, 22.07.2025.
- Perplexity** (2025, Methan): Prompt – Vergleich CO₂ und Methan Freisetzung, 31.07.2025.
- Perplexity** (2025, Rückkopplungen): Prompt – Was sind positive Rückkopplungen?, 22.07.2025.
- Perplexity** (2025, Subpolar Gyre): Prompt – Welche Bedeutung hat der Subpolar Gyre?, 22.07.2025.

Einzelaussagen und Zitate

- David I. Armstrong McKay*, Klimaforscher und Experte für Klimakippunkte, University of Exeter, zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte), sowie: University of Oxford, Global Tipping Points (2023, Report).
- Niklas Boers*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Professor für Erdsystemmodellierung an der Technischen Universität München (TUM), zitiert nach: scinexx.de (2021, Kippunkt).
- Mark Branson*, Präsident der Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht (BaFin), zitiert nach: BaFin (2025, Verbesserungspotenzial).
- Rowan Douglas*, CEO, Howden Insurance Group, zitiert nach: Howden (2025, Insurability).
- Reiner Eichenberger*, Professor für Theorie der Finanz- und Wirtschaftspolitik an der Universität Freiburg in der Schweiz und Forschungsdirektor des CREMA, zitiert nach: NZZ (2025, Klimawandel).
- Albert Einstein*, Nobelpreisträger und Begründer der Relativitätstheorie, zitiert nach: IFoA (2024, Scorpion).
- Frank Elderson*, Direktoriumsmitglied und stellvertretender Vorsitzender im Aufsichtsgremium der EZB, zitiert nach: EZB (2025, Crises).
- Piers Forster*, Direktor des Priestley International Centre for Climate, University of Leeds, zitiert nach: The Conversation (2025, 3 Years).
- António Guterres*, UN-Generalsekretär, zitiert nach: UN (2024, Climate Hell).
- Annika E. Högner*, Klimaforscherin am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) sowie am IIASA-Institute, zitiert nach: Goethe-Universität Frankfurt (2024, Kipp-Risiken).
- Shfaqat Khan*, Professor, Fakultät für Weltraumforschung, Technologie, Geodäsie und Erdbeobachtung, Technische Universität Dänemark, zitiert nach: scinexx.de (2020, Prognosen).
- Thomas Kleinen*, wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Wechselwirkung Klima-Biogeosphäre, Abteilung Land im Erdsystem, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg; zitiert nach: Science Media Center (2025, Permafrost).
- Christian Knoblauch*, Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN) der Universität Hamburg, zitiert nach: GFZ (2018, Permafrost).
- Timothy Lenton*, Experte für Klimakippunkte, Professor an der University of Exeter und Leiter des Global Systems Institute, zitiert nach: OECD (2022, Climate Tipping Points); Germanwatch (2023, Korallenriffe); University of Oxford, Global Tipping Points (2023, Report); sowie: IFoA (2025, Solvency).
- Susanne Liebner*, GFZ, Leiterin der Helmholtz-Nachwuchsgruppe MicroCene, zitiert nach: ESKP (2017, Permafrost).
- Wolfgang Lucht*, Leiter der Forschungsabteilung für Erdsystemanalyse am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und Inhaber des Alexander von Humboldt-Lehrstuhls für Nachhaltigkeitswissenschaften am Geografischen Institut der Humboldt-Universität zu Berlin sowie berufenes Mitglied des Sachverständigenrats für Umweltfragen der Bundesregierung (SRU); zitiert nach: ntv (2024, Klimawandel).
- Katja Matthes*, Direktorin, GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung, Kiel, zitiert nach: Matthes (2021, Jahre).
- Fabien Maussion*, Professor für polare Umweltveränderungen an der Universität Bristol, zitiert nach: Euronews (2025, Gletscher).
- Conor Purcell & Michael Keary*, Klimaforscher, zitiert nach: Germanwatch (2023, Amazonas-Regenwald).
- Stefan Rahmstorf*, Leiter der Abteilung für Erdsystemanalyse, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), zitiert nach: PIK (2021, Golfstrom-System); ntv (2025, Winter); sowie: Tagesschau (2025, Kippunkt).
- Johan Rockström*, Direktor, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte).
- Martin Rypdal*, Professor, Fakultät für Mathematik und Statistik, Arktische Universität Norwegens in Tromsø, zitiert nach: scinexx.de (2021, Kippunkt).
- Clemens Schannwell*, Forscher am Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, zitiert nach: Max-Planck-Gesellschaft (2024, Schmelze).
- Lilian Schuster*, Klimaforscherin, Department of Atmospheric and Cryospheric Sciences (ACINN), Universität Innsbruck, zitiert nach: Euronews (2025, Gletscher).
- David Stadelmann*, Professor für Wirtschaftspolitik und Entwicklungsökonomik an der Universität Bayreuth, zitiert nach: NZZ (2025, Klimawandel).
- Nicholas Stern*, ehemaliger Chefökonom der Weltbank, Professor an der London School of Economics und Verfasser des „Stern-Report“, zitiert nach: Stern (2006, Economics).
- Günther Thallinger*, Mitglied des Vorstands der Allianz SE, München, Veröffentlichung bei LinkedIn.
- Leonie Wenz*, stellvertretende Leiterin der Abteilung Komplexitätsforschung am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, zitiert nach: PIK (2024, Schäden).
- Steve Widdicombe*, Professor für Meeresforschung am Plymouth Marine Laboratory (PML), zitiert nach: Guardian (2025, Timebomb).
- Ricarda Winkelmann*, Leiterin der Arbeitsgruppe Ice Dynamics sowie des FutureLab für Erdsystem-Resilienz im Anthropozän am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Professorin für Klimasystemanalyse am PIK und an der Universität Potsdam, zitiert nach: PIK (2022, Klima-Kippunkte).
- Nico Wunderling*, Erdsystemforscher am Center for Critical Computational Studies (C³S), Frankfurt, zitiert nach: Lohmann (2025, Klimagespräche); sowie: Wunderling (2025, Kippelementen).

Expertenbeiträge

- Biber, A.** (2025, Paradigmenwechsel): Paradigmenwechsel im Finanzsystem: Klimarisiken als Preisfaktor, Expertenbeitrag zur vorliegenden Analyse, September 2025, Wiesbaden/Bad Homburg 2025.
- Wunderling, N.** (2025, Amazonas): Der Regenwald des Amazonas – Ein Kippelement unter doppeltem Druck, Expertenbeitrag zur vorliegenden Analyse, August 2025, Frankfurt/Bad Homburg 2025.
- Wunderling, N.** (2025, Statement): Persönliche Botschaft zur vorliegenden Analyse, September 2025, Frankfurt/Bad Homburg 2025.
- Wunderling, N.** (2025, Hochrisikozone): Expertenbeitrag zur vorliegenden Analyse, August 2025, Frankfurt/Bad Homburg 2025.
- Wunderling, N.** (2025, Kippelemente): Expertenbeitrag zur vorliegenden Analyse, August 2025, Frankfurt/Bad Homburg 2025.
- Wunderling, N.** (2025, Kippunkte): Erdsystemdynamiken: Kippunkte und ihre Wechselwirkungen, Expertenbeitrag zur vorliegenden Analyse, August 2025, Frankfurt/Bad Homburg 2025.
- Wunderling, N.** (2025, „Overshoot“): Temperatur-Overshoots und ihre Risiken für Kippelemente, Expertenbeitrag zur vorliegenden Analyse, August 2025, Frankfurt/Bad Homburg 2025.

Videos

- ARD** (2025, Klima): Kampf ums Klima – Was, wenn jemand die Sonne abdunkelt?, veröffentlicht 11.08.2025, <https://www.ardmediathek.de/video/auf-spurensuche-oder-ard-wissen/kampf-ums-klima-was-wenn-jemand-die-sonne-abdunkelt/br/Y3JpZDovL2JyLmRlL2Jyb2FkY2FzdC9iZmJlMWQzNi0yM2ZkLTRiOWUtYjdmNi0xMTU3ZDIjZmE3NDhf25saW5lYnJvYWRjYXN0>, zuletzt abgerufen am 14.08.2025.
- ARTE** (2022, Geoengineering): Kann Geoengineering das Klima retten?, veröffentlicht 22.01.2022, <https://www.arte.tv/de/videos/101938-006-A/kann-geoengineering-das-klima-retten/>, zuletzt abgerufen am 25.08.2025.
- D2030** (2024, Kippunkte): Kippunkte in Klima und Gesellschaft – Wenn Systeme ins Wanken geraten; Futures Lounge # 31, veröffentlicht 09.04.2024, <https://d2030.de/futures-lounge-31-kippunkte-in-klima-und-gesellschaft-wenn-systeme-ins-wanken-geraten/>, zuletzt abgerufen am 26.08.2025.
- IEA** (2023, Energy): Clean Energy Growth Is Keeping Open the Path to Limiting Global Warming to 1.5°C, veröffentlicht 02.10.2023, <https://youtu.be/Byl-UiF59KA>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Lenton, T.** (2024, Tipping Points): Global Tipping Points: The Future Is Ours to Choose, veröffentlicht 30.09.2024, <https://www.youtube.com/watch?v=v5rz1LnCsp8>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- New Scientist** (2023, Climate Hell): António Guterres: „We Are on a Highway to Climate Hell“, veröffentlicht 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=K7CiMiiC2f8>, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- SenckenbergWorld** (2024, Future): Prof. Dr. Johan Rockström: A Safe and Just Future for Humanity on Earth, veröffentlicht 2024, <https://youtu.be/p9ej7yHxaps?feature=shared>, zuletzt abgerufen am 27.08.2025.
- WCRP** (2022, CMIP): CMIP in Brief, veröffentlicht 14.10.2022, <https://youtu.be/AIAzLlrMXWM>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.
- Welt der Physik** (2023, High Arctic): Canadian High Arctic, NPG, veröffentlicht 12.09.2023, <https://www.youtube.com/watch?v=Myf637FJsYA>, zuletzt abgerufen am 29.08.2025.
- WMO** (2025, Reel): 2024 Was Likely the First Calendar Year to Be More Than 1.5°C Above the Pre-Industrial Era, veröffentlicht 19.06.2025, <https://www.facebook.com/watch/?v=1379623189760064>, zuletzt abgerufen am 02.09.2025.

Rechtliche Hinweise: Alle Angaben und Quellen werden sorgfältig recherchiert. Für Vollständigkeit und Richtigkeit der dargestellten Information wird keine Gewähr übernommen. Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Jede weitere Verwendung, insbesondere der gesamte oder auszugsweise Nachdruck oder die nicht nur private Weitergabe an Dritte, ist nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung von FERI gestattet. Die nicht autorisierte Einstellung auf öffentlichen Internetseiten, Portalen oder anderen sozialen Medien ist ebenfalls untersagt und kann rechtliche Konsequenzen nach sich ziehen. Die angeführten Meinungen sind aktuelle Meinungen, mit Stand des in diesen Unterlagen aufgeführten Datums. FERI AG, Stand 2025

Bisherige Analysen und Publikationen im FERI Cognitive Finance Institute:

Studien:



1. Carbon Bubble und Dekarbonisierung (2017)
2. Overt Monetary Finance (OMF) (2017)
3. Die Rückkehr des Populismus (2017)
4. KI-Revolution in der Asset & Wealth Management Branche (2017)
5. Zukunftsrisiko „Euro Break Up“ (2018)
6. Die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft, (2018)
7. Wird China zur Hightech-Supermacht? (2018)
8. Zukunftsrisiko „Euro Break Up“, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage (2018)
9. Risikofaktor USA (2018)
10. Impact Investing: Konzept, Spannungsfelder und Zukunftsperspektiven (2019)
11. „Modern Monetary Theory“ und „OMF“ (2019)
12. Alternative Mobilität (2019)
13. Digitalisierung – Demographie – Disparität (2020)
14. „The Great Divide“ (2020)
15. Zukunftstrend „Alternative Food“ (2020)
16. Digitalisierung – Demographie – Disparität, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage (2020)
17. „The Great Progression“ (2021)
18. „Blockchain und Tokenisierung“ (2021)
19. „The Monetary Supercycle“ (2021)
20. Wasserstoff als Energiequelle der Zukunft (2022)
21. Sustainable Blue Economy (2022)
22. Chinas globales Powerplay (2022)
23. Quo vadis, Europa? (2023)
24. Neue Weltordnung – „Made in China“ (2023)
25. Vorteil Biodiversität – Lösungsansätze und Investitionschancen im Einklang mit der Natur (2024)
26. Globale Rezession der Freiheit (2024)
27. Die BioTech-Revolution – Neue Dynamik durch innovative Technologien (2024)
28. Climate Tipping Points – Das Umkippen essentieller Klimasysteme als globales Risiko (2025)

Cognitive Comments:



1. Network Based Financial Markets Analysis (2017)
2. Zwischen Populismus und Geopolitik (2017)
3. „Neue Weltordnung 2.0“ (2017)
4. Kryptowährung, Cybermoney, Blockchain (2018)
5. Dekarbonisierungsstrategien für Investoren (2018)
6. Innovation in blockchain-based business models and applications in the enterprise environment (2018)
7. Künstliche Intelligenz, Quantencomputer und Internet of Things - Die kommende Disruption der Digitalisierung (2019)
8. Quantencomputer, Internet of Things und superschnelle Kommunikationsnetze (2019)
9. Was bedeutet die CoViD19-Krise für die Zukunft? (2020)
10. Trouble Spot Taiwan – ein gefährlich unterschätztes Problem (2021)
11. Urban Air Mobility – Flugdrohnen als Transportmittel der Zukunft (2021)
12. „Longevity“: Megatrend Langlebigkeit – Die komplexen Auswirkungen und Konsequenzen steigender Lebenserwartung (2022)
13. Hightech-Metalle und Seltene Erden – Akute Rohstoff-Risiken für Europas Zukunft (2022)
14. Amerika auf dem Weg zur Autokratie – Anatomie und Perspektiven einer gespaltenen Großmacht (2022)
15. Vertical Farming – Technologische Innovation zur Umgestaltung des globalen Ernährungssystems (2023)
16. Generation Z – Potentiale der jungen Generation für globale Disruption (2023)
17. KI: The Next Level – Die transformative Wucht des Megatrends „Künstliche Intelligenz“ (2023)
18. Chinas Angriff auf den US-Dollar – Maßnahmen, Motive und mögliche Risiken für das westliche Finanzsystem (2023)
19. „Trump reloaded“ – Drohender Umbau der USA in eine Präsidialdiktatur (2024)
20. 3D-Druck und Additive Fertigung: Unterschätztes Potential zur Transformation wichtiger Zukunftstrends (2024)
21. Takeoff der Tokenisierung – 2024 als Katalysatorjahr der Token-Ökonomie (2024)
22. „Space Cold War“: Massive Militarisierung des Weltraums als globales Risiko (2024)
23. Quantenzeitalter – Quantencomputing als Gamechanger für Finanz- und Realwirtschaft (2024)
24. Digitale Machtkonzentration: Zunehmende Dominanz und drohende Risiken einer neuen Tech-Oligarchie (2025)

Cognitive Briefings:



1. Ressourcenverbrauch der Digital-Ökonomie (2020)
2. Globale Bifurkation oder „New Cold War“? (2020)
3. Digitaler Euro: Das Wettrennen zwischen Europäischer Zentralbank und Libra* Association (2020)
4. Herausforderung „Deep Fake“ – Wie digitale Fälschungen die Realität zerstören (2021)
5. Geoökonomische Zeitenwende – Wie Großmachtkonflikte die Weltwirtschaft zerlegen (2022)
6. Brennpunkt Taiwan – Zunehmende Eskalationsrisiken um Taiwan (2023)
7. CRISPR/Cas – Molekulare Genschere revolutioniert Biotechnologie und Medizin (2023)
8. „New Space“ – Das Weltall als Wirtschaftsraum der Zukunft (2024)
9. Carbon Capture – Dekarbonisierung durch CO₂-Entnahme (2025)
10. Global Choke Points – Maritime Engpässe als unterschätzter Risikofaktor für Weltwirtschaft und Geopolitik (2025)

„Klimarisiken sind Finanzrisiken.“

McCarthy/Odier (2025, Finanzrisiken)

„Global risk management is currently failing and blind to systemic risk.“

Timothy Lenton, Klimaexperte, 2025

„Entire regions are becoming uninsurable. This is a systemic risk that threatens the very foundation of the financial sector.“

Günther Thallinger, Versicherungsexperte, 2025

„Overshooting 1.5°C puts the world in a danger zone where further tipping points pose catastrophic risks.“

University of Exeter, Global Tipping Points (2025, Report)

„This means that, at the tipping point, a small shift in the background climate can trigger a large-scale qualitative system change.“

Wunderling et al. (2024, Interactions and Cascades)

„We are in the midst of a climate emergency, and the window to act is closing fast.“

UNEP (2024, Gap)



Erkenntnisse der Cognitive Finance
ISSN 2567-4927

FERI AG | FERI Cognitive Finance Institute
Das strategische Forschungszentrum der FERI Gruppe
Haus am Park
Rathausplatz 8 – 10
61348 Bad Homburg v.d.H.
T +49 (0)6172 916-3631
umwelt@feri-institut.de
www.feri-institut.de

