

Karl-Heinz Bernhardt

## **Das Klimasystem der Erde im Licht des fünften IPCC-Sachstandsberichtes**

*Leicht veränderte Kurzfassung eines Vortrages vor der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften am 12. Juni 2014, die auf der Website [www.leibnizsozietat.de](http://www.leibnizsozietat.de) zur Diskussion steht. Eine ausführliche Fassung des Vortrages mit Abbildungen und ausführlichen Literaturangaben wird zur Veröffentlichung in „Leibniz Online“ vorbereitet.*

Das Klimasystem der Erde, bestehend aus Atmo-, Hydro-, Kryo-, Bio- und Pedo- bzw. Lithosphäre sowie Techno/Noosphäre, ist ein hochkomplexes nichtlineares System, das sowohl infolge interner Wechselwirkungen als auch unter dem Einfluss externer Antriebe ständigen Schwankungen in den unterschiedlichsten Raum- und Zeitbereichen unterliegt und somit einen un-aufhörlichen Klimawandel hervorbringt.

Nach dem vorliegenden fünften Sachstandsbericht (Fifth Assessment Report, AR5) des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) hat sich die schubweise globale Erwärmung („global warming“) – der Anstieg der global gemittelten Lufttemperatur an der Erdoberfläche – seit der Dekade 1971-1980, wenn auch im Anschluss an das El Niño-Jahr 1998 deutlich verlangsamt, bis zur Gegenwart (Stand 2012) fortgesetzt. Nach Hinzunahme der Daten des Jahres 2013 entfallen mit Ausnahme des Jahres 1998 alle 12 der bisher weltweit wärmsten Jahre auf das 21. Jahrhundert ab dem Jahre 2001. Im Gegensatz zur globalen Mitteltemperatur steigt der mittlere Meeresspiegel seit Beginn des 20. Jahrhunderts relativ gleichförmig und in den letzten Jahren sogar beschleunigt an, in den Jahren von 1993 bis 2010 um durchschnittlich 3,2 mm/Jahr.

Temperaturzunahme und Meeresspiegelanstieg verweisen auf Imbalancen im Klimasystem. Im Bericht der Arbeitsgruppe 1 des IPCC (WG 1, The Physical Science Basis) wird für den Zeitraum von 1971 bis 2010 eine mitt-

lere positive Bilanzstörung an der Atmosphärenobergrenze von  $0,42 \text{ W/m}^2$  veranschlagt, was ca. 0,12% des global gemittelten solaren Strahlungsenergiezuflusses entspricht. Der genannte Energieüberschuss kommt hauptsächlich der durch Messreihen nachweisbaren Erwärmung der Ozeane, aber auch dem Abschmelzen kontinentaler Gletscher und polarer Eisschilde zugute, beide Effekte von gleicher Größenordnung für den Meeresspiegelanstieg verantwortlich. Nach Auffassung des Vortragenden ist der Prozessparameter Strahlungsimbalance besser zur Kennzeichnung des derzeitigen Klimawandels geeignet als ein Zustandsparameter, wie die (regional unterschiedliche) Veränderung der Lufttemperatur an der Erdoberfläche. Auch legen die Auswirkungen dieser Imbalance auf das gesamte Klimasystem nahe, im Falle positiver Imbalance von „global heating“ anstelle von „global warming“ zu sprechen, wobei die Aufteilung dieser globalen Wärmezufuhr auf die einzelnen Komponenten des Klimasystems, insbesondere auf den Ozean, die Atmo- und die Kryosphäre, hauptsächlich zirkulationsbedingt erfolgt und damit auch von systeminternen Schwankungen beeinflusst wird.

Während die weltweite anthropogene Primärenergieproduktion um Größenordnungen unter den natürlichen Energieumsätzen im Klimasystem liegt und daher – anders als im lokalen Bereich (Stadtklima) – für den globalen Klimawandel unmittelbar keine Rolle spielt, ist die vom Menschen verursachte Störung der Konzentration atmosphärischer Treibhausgase ein Hauptfaktor für den gegenwärtigen Klimawandel. Die Verbrennung in Jahrmillionen angehäufter Vorräte an fossilem Kohlenstoff binnen einer kurzen historischen Epoche stellt einen Prozess geologischen Maßstabes („Anthropozän“) dar. Allein die im Arbeitsgruppenbericht (WG 1) genannte Masse des im Zeitraum von 1750 bis 2011 durch  $\text{CO}_2$ -Emission bei Verbrennung, Zementproduktion und Landnutzung in die Atmosphäre abgegebenen (und dort zu ca. 43% verbliebenen) Kohlenstoffs macht etwa zwei Drittel des derzeitigen Kohlenstoffinventars unserer Lufthülle aus.

„Drivers of Climate Change“ im Sinne des IPCC-Berichtes sind Substanzen und Prozesse (natürliche und anthropogene), die die Energiebilanz der Erde verändern. Deren strahlungsbedingter Effekt wird, wie in den vorangegangenen Sachstandsberichten auch, als „radiative forcing“ bezeichnet und ist unter Einführung eines zusätzlichen „effective radiative forcing“ tabelliert bzw. graphisch dargestellt. Wegen der Definition des letzteren, aber auch zur Einsichtnahme in die Unsicherheiten der Schätzungen bzw. in die Veränderungen gegenüber früheren Sachstandsberichten, muss auf das Original des fünften Sachstandsberichtes verwiesen werden, dessen elektronische Version, wie

die der vorangegangenen Berichte auch, unter [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1) eingesehen und kostenfrei heruntergeladen werden kann. Der gleiche Verweis gilt für die Ausführungen zur Klimasensitivität („equilibrium sensitivity“ und „transient climate response“), die den Effekt einer angenommenen Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf die Mitteltemperatur an der Erdoberfläche bezeichnet und damit auch den Einfluss einer Vielzahl von – positiven wie negativen – Rückkoppelungsmechanismen im Klimasystem widerspiegelt.

An der Spitze der Strahlungsantriebe für den Klimawandel seit dem Bezugsjahr 1750 steht nach wie vor die anthropogene Konzentrationszunahme der Treibhausgase CO<sub>2</sub> und, mit deutlichem Abstand, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O sowie der Halocarbone, reduziert durch die Emission von Aerosolen und die Albedoerhöhung im Gefolge von Veränderungen der Landnutzung. Im vorliegenden Sachstandsbericht wird geschlussfolgert, dass mehr als die Hälfte des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur im Zeitraum von 1951 bis 2010 „very likely“ der anthropogenen Zunahme der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration geschuldet ist. Diese Einschätzung wird durch die wiederum bestätigte Tatsache gestützt, dass – diesmal stärker regionalisierte – Simulationsexperimente zur Nachbildung des beobachteten Temperaturverlaufs im 20. und zu Beginn des 21. Jahrhunderts nur bei Berücksichtigung natürlicher (solare Einstrahlung, vulkanische Aerosole) und anthropogener Antriebe eine befriedigende Übereinstimmung mit den Beobachtungen ergeben, wohingegen die alleinige Berücksichtigung natürlicher Antriebe insbesondere den Temperaturanstieg in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nicht adäquat wiedergibt. Schließlich belegen auch von jeglichen Modellannahmen unabhängige statistische Untersuchungen die Rolle natürlicher und anthropogener Antriebe für den eingetretenen Temperaturverlauf.

Zu diskutieren bleibt der Anteil (natürlicher und anthropogener) Antriebe am beobachteten Klimawandel gegenüber der Rolle systeminterner Schwankungen („internal“ oder „nature climate variability“) im Klimasystem, die mit den Hilfsmitteln der Stochastik oder der Chaostheorie untersucht werden. Das betrifft z. B. neben dem ENSO(El Niño/La Niña)-Phänomen eine erhebliche Anzahl weiterer atmosphärisch-ozeanischer Zirkulationsschwankungen, die in anderen Raum-Zeitmaßstäben auch deterministisch betrachtet und mittels dynamischer Ozean-Atmosphärenmodelle behandelt werden können. Durch regionale synoptische Phänomene bedingte Perioden extremer Eisschmelze auf Grönland, um ein weiteres Beispiel zu nennen, können sich als systeminterne Schwankung im Ablauf des globalen Meeresspiegelanstieges

abbilden. Nach Meinung des Vortragenden müssen fundamentale energetische Faktoren (die globale Strahlungsungleichgewichte bzw. die den einzelnen Substanzen zuzuordnenden Strahlungsantriebe) des Klimawandels und systeminterne Schwankungen simultan und nicht als einander ausschließend betrachtet werden. Um dies am Würfelbeispiel zu verdeutlichen: Die in einer Folge von Würfeln auftretenden Augenzahlen gehorchen bekannten statistischen Gesetzen, die aber modifiziert werden, wenn der „richtige“ Würfel durch einen solchen mit asymmetrischer Masseverteilung ersetzt wird, bei dessen Benutzung nicht mehr alle Augenzahlen gleichwahrscheinlich sind. In gleicher Weise werden systeminterne Schwankungen bei höherer Treibhausgaskonzentration und damit erhöhtem Strahlungsantrieb durch veränderte statistische Parameter – z. B. eine erhöhte globale Mitteltemperatur – charakterisiert sein.

Zur Erklärung des „Hiatus“ im Ablauf der globalen Erwärmung wird im IPCC-Bericht (WG 1) ein Zusammenspiel von „internal climate variability“ mit reduziertem Strahlungsantrieb als Folge mehrerer kleinerer Vulkaneruptionen und eines tiefen Minimums im Sonnenfleckenzyklus angenommen; auch die lang anhaltende neutrale bzw. La Niña-Phase im ENSO-Zyklus, eine Abnahme des stratosphärischen Wasserdampfgehaltes sowie eine möglicherweise erhöhte Wärmeaufnahme des Ozeans einschließlich eines verstärkten Wärmetransportes in tiefere Schichten werden diskutiert, wozu noch ein erhöhter Wärmeverbrauch im Klimasystem infolge forcierter Eisschmelze in Erwägung gezogen werden sollte.

Was schließlich die Zukunft des Klimasystems der Erde anlangt, so sind nur Wahrscheinlichkeitsaussagen bzw. Projektionen möglicher Entwicklungen sinnvoll. Letztere werden von systeminternen Schwankungen, vor allem aber von Veränderungen in allen Komponenten des Klimasystems einschließlich der solaren Wellen- und Partikelstrahlung einerseits und gesellschaftlichen Aktivitäten, wie Landnutzung und Energieerzeugung andererseits, bestimmt. Klimaprojektionen schließen damit Szenarien unterschiedlichen ökonomischen Wachstums, sozialer Differenzierung, fossiler und nichtfossiler Energienutzung sowie der Technologienentwicklung ein. Ein neuer Weg für Klimaprojektionen wird im fünften Sachstandsbericht mit der Vorgabe von repräsentativen Konzentrationspfaden („Representative Concentration Pathways“) gewählt, die von ihrem Ende her – dem für das Jahr 2100 angestrebten bzw. tolerierten Strahlungsantrieb – definiert sind. In diesem Rahmen können in die Simulationsexperimente sozialökonomische und energiewirtschaftliche Entwicklungen sowie Maßnahmen der Klimapo-

litik einbezogen werden, bei deren Gestaltung auch ethische Gesichtspunkte zu beachten sind.

Somit erscheint die nähere Klimazukunft in interaktiver Wechselwirkung von Natur und Gesellschaft offen, aber in Grenzen gestaltbar. Für fernere Zeithorizonte ist auch die Möglichkeit abrupter Klimaänderungen in Betracht zu ziehen, so im Zusammenhang mit der thermohalinen Zirkulation (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC), die sich nach Modellrechnungen im Lauf des 21. Jahrhunderts sehr wahrscheinlich abschwächen wird, während ein abrupter Zusammenbruch in diesem Jahrhundert als sehr unwahrscheinlich gilt, im Falle fortgesetzter Klimaerwärmung aber für spätere Zeit nicht ausgeschlossen werden kann. Weitere mögliche Ursachen abrupter Klimaänderungen, die auch irreversibel sein können, liegen im Verhalten der Permafrostböden (Kohlendioxid- und Methanspeicher), der Methanhydrate und dem „Dieback“ tropischer und borealer Wälder begründet. Diskutiert werden schließlich das Verhalten der Eisschilde der Ost- und Westantarktis und besonders Grönlands im Zeitbereich eines Jahrtausends, der Rückgang der sommerlichen Meereisbedeckung im Nordpolargebiet sowie lang anhaltende Trockenperioden und veränderte Monsunzirkulationen.

Alles in allem erscheint die Tätigkeit des IPCC in wissenschaftshistorischer Perspektive als ein bemerkenswertes Beispiel teilweiser Selbstorganisation wissenschaftlicher Arbeit. Das im Jahre 1957 gestartete Internationale Geophysikalische Jahr (IGY), ein Vorläufer der heutigen weltweiten Kooperation auf dem Feld der Geo- und Kosmoswissenschaften, wurde seinerzeit gelegentlich als eine „Olympiade des Geistes“ gefeiert. Gleiches könnte für die in regelmäßigen, bisher sechs- bis siebenjährigen Abständen publizierten IPCC-Sachstandsberichte geltend gemacht werden – auch Olympiaden schließen Erfolge und Niederlagen ein und Skandale, darunter von Außenseitern befördert, nicht aus!