Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *125/126 (2016), 25–47*

Karl-Heinz Bernhardt

Komplexität und Einfachheit im Klimasystem der Erde

1. Vorbemerkungen

Komplexe Systeme zeichnen sich durch große Vielfalt der Verknüpfungen ihrer konstituierenden Elemente aus. Die Komplexität steigt mit der Anzahl der Elemente und der Kompliziertheit ihrer gegenseitigen (insbesondere nichtlinearen) Verbindungen (vgl. „Komplexität“, Wikipedia, Stand April 2015). Beschränkte Beschreib- und Vorhersagbarkeit ist ein charakteristisches Merkmal der in diesem Sinne komplexen Systeme, aber keinesfalls auf solche beschränkt: Conways „Game of Life“ und andere Versionen zellulärer Automaten werden durch einfache Beziehungen zwischen einer beschränkten Zahl binärer Elemente angetrieben, zeigen aber desungeachtet Erscheinungen von Strukturbildung und Chaos. Im Bereich der Physik der Atmosphäre hat beispielsweise bereits Friedrich 1989 in einer leider unveröffentlicht gebliebenen Diplomarbeit mittels zellularer Automaten Strukturen der luftmasseninternen wie der frontalen Trocken- und Feuchtkonvektion simuliert.

Auch das Planetensystem, in Bezug auf das Gravitationsfeld sicher nicht komplex im eingangs umrissenen Sinn, liefert nicht für beliebige Zeiträume „einfache“ stabile, deterministische, sondern auch chaotische Lösungen der Gleichungen der Planetenbewegung – das „Poincare’-Abenteuer“ (vgl. Ebeling 2014, S. 74). Umso abwegiger mag auf den ersten Blick die Verknüpfung von Einfachheit und (zweifellos hochgradiger) Komplexität für das Klimasystem der Erde erscheinen. Jedoch können in Bezug auf das komplexe Gesamtsystem elementare Prozesse auf dem Wirken einfacher Prinzipien und Mechanismen beruhen, wie beispielsweise Müller 2010 am Beispiel biochemischer Prozesse in der hochkomplexen Zelle demonstriert hat. Diesen Gedanken weiterführend, gelangt man zur Betrachtung des komplexen Systems Gesamtorganismus, dessen Werden und Vergehen wiederum auf dem Wirken einfacher Prinzipien des Zellzyklus beruht und der seinerseits Element eines übergeordneten komplexen Systems, eines Biotops ist. Existiert vielleicht in der Natur eine Hierarchie von Einfachheit und

Komplexität, indem aus dem Zusammenwirken einfacher Prinzipien/Mechanismen ein komplexes System resultiert, das auf der Grundlage einfacher Wechselwirkung als Subsystem eines wiederum komplexen Systems nächst höherer Ordnung figuriert – im obigen Beispiel etwa in der Aufeinanderfolge Zelle – Organismus – Biotop – Biosphäre? In der Atmosphäre und im Meer als Teilen des Klimasystems der Erde existiert eine seit langem bekannte Hierarchie von Bewegungsformen unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Maßstabes (z.B. Fortak 1982, S. 88), die unter dem Gesichtspunkt von Einfachheit und Komplexität näher zu analysieren wäre (Abb. 1).

Einfachheit als Erkenntnisprinzip kann in Bezug auf komplexe Systeme, wie die Zelle, offenbar in der Analyse von einfachen Wirkprinzipien bestehen, deren Kenntnis das Verhalten des Gesamtsystems verständlich, beschreib- und eventuell auch modellier- und vorhersagbar macht. Eine andere Möglichkeit besteht in der empirischen Suche nach einfachen, räumlichen oder zeitlichen (auch raumzeitlichen), z.B. periodischen Strukturen des komplexen Systems, die ebenfalls Aussagen über das Systemverhalten ermöglichen und die anschließend eventuell wiederum auf einfache Wirkprinzipien und -mechanismen zurückgeführt werden können.

2. Zur Geschichte der Kenntnis des Klimasystems

Der Definition des Klimas wurden noch im 20. Jahrhundert eigene Abhandlungen gewidmet (z.B. Schneider-Carius 1961; vgl. auch Hupfer 1991, Abschnitt 2.1.1.1.). Heute wird im Anschluss an die klassische Begriffsbestimmung des Klimas als mittlerer Zustand der Atmosphäre und durchschnittlicher Verlauf der Witterung an einem gegebenen Ort durch Hann (1839–1921) und Köppen (1846–1940) das Klima gewöhnlich als „mittleres Wetter“, im neuesten IPCC-Sachstandsbericht

> „as the statistical description in terms of the mean and variability of relevant quantities over a period of time ranging from months to thousands or millions of years“ unter Einbeziehung der „associated statistics (frequency, magnitude, persistence, trends, etc.) often combining parameters to describe phenomena such as droughts.“ (IPCC 2013, p. 126)

definiert. Das entspricht durchaus unserer (Bernhardt 1987) Auffassung des Klimas als der statistischen Gesamtheit atmosphärischer Zustände und Prozesse in ihrer raumzeitlichen Verteilung, „statistische Gesamtheit“ dabei als eine mit statistischen Methoden zu beschreibende Gesamtheit reeller (beobachteter) oder virtueller (simulierter) atmosphärischer Zustände und Prozesse verstanden.

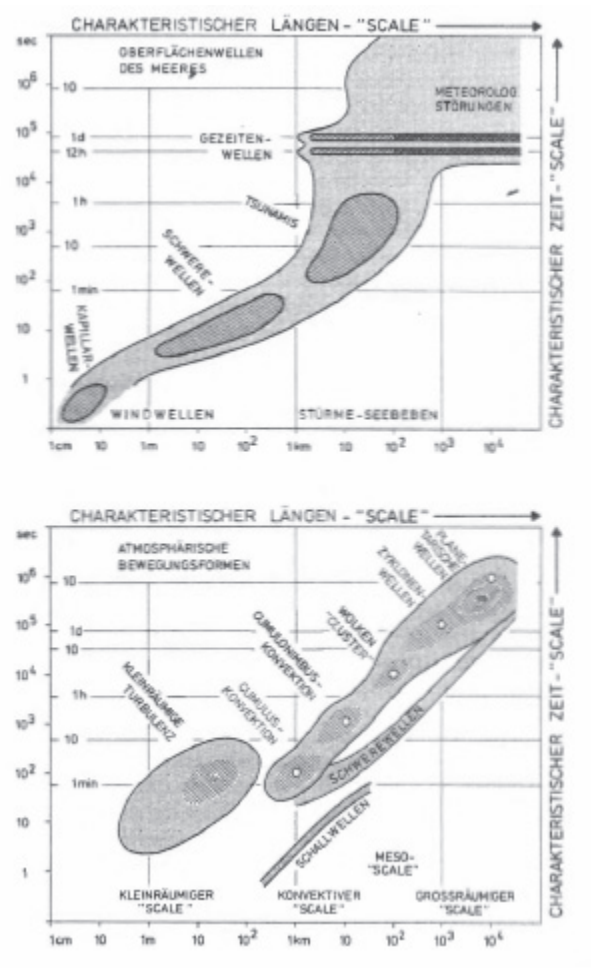

Abb. 1: Charakteristische Längen- und Zeitskalen von Oberflächenwellen des Meeres (oben) und atmosphärischen Bewegungsformen (unten)

(nach Fortak 1982, S. 88)

Der bereits in der Antike geprägte Begriff des Klimas gilt als von „κλιμα“ = Neigung abgeleitet, was sich auf den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen bezieht, womit die Einteilung der Klimazonen nach der geographischen Breite gegeben und die Sonnenstrahlung als hauptsächlicher Klimafaktor erkannt war, der nach Meinung der antiken Autoren auch über die Bewohnbarkeit

der Breitenzonen entscheidet (vgl. z.B. Khrgian 1959 bzw. Khrgian 1970, Kapitel 5; Körber 1987, S. 66f.) Dass die Klimazonen den Charakter ihrer Bewohner prägen und das Klima den Ablauf der Geschichte bestimmt, ist Inhalt der sogenannten „Klimatheorie“ (dazu z.B. Müller 2005), eines unzulässigen philosophischen Reduktionismus im Sinne von Hörz 2010. Auf naturwissenschaftlicher Ebene gilt gleiches für das „solare Klima“, die noch bis zum Ende des 18. Jahrhunderts von Geographen, Astronomen und Physikern geübte spekulative Darstellung der zonalen Mitteltemperatur durch einfache mathematische Funktionen der geographischen Breite (Schneider-Carius 1955, S. 99ff.; Khrgian 1970, Kapitel 16; Körber 1987, S. 169ff.,).

Alexander von Humboldt (1769–1859) hat in seiner Abhandlung über die isothermen Linien aus dem Jahre 1817, die er im Jahre 1850 rückblickend die „ausgezeichnetste“ seiner Arbeiten nannte, mit der auf Temperaturmessungen beruhenden globalen Isothermenkarte die auf Beobachtungen und Messungen fußende moderne beschreibende Klimatologie begründet[1] und in der gleichen Arbeit bei der Unterscheidung zwischen solarem und realem Klima die „fremdartigen Ursachen“ beschrieben, die zusätzlich zum Einfall der Sonnenstrahlung das Klima eines Ortes bestimmen und unter diesen den Einfluss des Ozeans, Neigung und Beschaffenheit des Erdbodens, großräumige Orographie sowie Schnee- und Eisbedeckung des Festlandes bzw. des Meeres, angeführt, also bereits wesentliche Komponenten des Klimasystems nach heutigem Verständnis erfasst (vgl. Bernhardt 2003, S. 210). Im „Kosmos“, Band I (1845) schließlich lenkte er mit der Begriffsbestimmung des „Ausdruck(es) Klima“ durch „in seinem allgemeinsten Sinne alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsre Organe merklich afficiren“, bereits im Rahmen der Klimadefinition den Blick auf die Einwirkung der atmosphärischen Umwelt auf die Organismen. Zu diesen „Veränderungen“ – wohl als veränderliche Größen zu verstehen – zählte Humboldt neben den gängigen meteorologischen bzw. „Klima“elementen ausdrücklich auch „die Reinheit der Atmosphäre oder ihre Vermengung mit mehr oder minder schädlichen gasförmigen Exhalationen, endlich den Grad habitueller Durchsichtigkeit und Heiterkeit des Himmels, welcher nicht bloß wichtig ist für die vermehrte Wärmestrahlung des Bodens, die organische Entwicklung der Gewächse und die Reifung der Früchte, sondern auch für die Gefühle und ganze Seelenstimmung des Menschen“ (vgl. dazu Bernhardt 2003, S. 208ff.).

1 Zum Nachweis dieser und der im Folgenden zitierten Äußerungen Humboldts siehe Bernhardt 2003.

Am wichtigsten in unserem Kontext aber ist die im gleichen Werk (1845) formulierte Auffassung vom Wesen des Klimas, das zunächst „eine specifische Beschaffenheit des Luftkreises“ bezeichne; diese aber sei „abhängig von dem perpetuirlichen *Zusammenwirken* einer all- und tiefbewegten, durch Strömungen von ganz entgegengesetzter Temperatur mit der wärmestrahlenden *trocknen Erde*, die mannigfaltig gegliedert, erhöht, gefärbt, nackt oder mit Wald und Kräutern bedeckt ist.“ Damit wurden explizit vier der fünf Komponenten des heute so genannten Klimasystems – Atmosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre, Biosphäre und, bei Humboldt an dieser Stelle explizit nicht aufgeführt, Kryosphäre – und deren ständige gegenseitige Wechselwirkung benannt.

Ungeachtet der häufigen Bezugnahme auf die genannten Beiträge zur Begründung einer modernen Klimatologie wurde Humboldts Charakterisierung des komplexen Klimasystems über mehr als ein Jahrhundert explizit nicht aufgegriffen, geschweige denn weitergeführt. Flohn 1954 beispielsweise leitete seine damals viel gelesene Einführung in die am Wetterablauf orientierte „Witterungs“klimatologie zwar mit der üblichen Referenz an Humboldt ein, ohne aber auf dessen Gedanken zum Systemcharakter der klimabildenden Prozesse zurückzukommen. Auch in der zitierten Übersichtsdarstellung von Schneider-Carius 1961 lässt sich keinerlei Hinweis auf den systemischen Charakter des Klimas ausmachen, und in einem um die Mitte des 20. Jahrhunderts verbreiteten Handwörterbuch der Meteorologie (Keil 1950, S. 386) werden lediglich „diejenigen Wirkungen, die die Klima-Elemente beeinflussen“, als „Klimafaktor“ zusammengefasst, deren Zusammenwirken nach Art eines eingangs beschriebenen komplexen Systems aber außer Betracht gelassen. Und noch im meteorologischen Wörterbuch von Khromov und Mamontova 1974, dritte Auflage, werden unter dem Stichwort „klimabildende Prozesse“ zwar für die Atmosphäre charakteristische Prozesse, wie Wärme- und Feuchteaustausch mit der Unterlage und die allgemeine Zirkulation zusammengestellt und unter „Klimafaktoren“ die Aktion der klimabildenden Prozesse unter den gegebenen geographischen Bedingungen, wie Breiten- und Höhenlage, Land-Meer-Verteilung, Relief, Schnee- oder Pflanzendecke – sämtlich Bestimmungsstücke des Klimasystems – aufgeführt, ohne aber zu diesem (oder zu einem äquivalenten) Begriff vorzudringen.

Im Jahre 1987 endlich werden in einem deutschsprachigen Lexikon (Meyer 1987) Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Landoberflächen und Biosphäre als Klimasystem benannt und festgestellt, dass diese Subsysteme „durch vielfältige nichtlineare Wechselwirkungen verbunden“ sind (Meyer

1987, S. 212), und um die Jahrtausendwende wird im Wörterbuch der Amerikanischen Meteorologischen Gesellschaft das Klimasystem

> „consisting of the atmosphere, hydrosphere, lithosphere and biosphere, determining the earth's climate as the result of mutual interactions among the components of the climate system and responses to external influences (forcing)"

vorgestellt (Glossary 2000, p. 139), nachdem in der Zwischenzeit bereits ein Sammelwerk zum „Klimasystem der Erde" (Hupfer 1991) erschienen war.

Die Herausbildung dieses Begriffes wie auch der Einblick in Struktur und Funktionsweise des Klimasystems resultieren offenbar aus der neuen Etappe der Erderkundung, die mit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGY 1957/58), zugleich Beginn der Weltraumfahrt (vgl. z.B. 50 Jahre Weltraumforschung 2008) eingesetzt und über das Globale Atmosphärische Forschungsprogramm (GARP 1967–82) auch zum Weltklimaprogramm (WCP) im Gefolge der ersten Weltklimakonferenz der Meteorologischen Weltorganisation (WMO) im Jahre 1979 sowie 1988 zur Gründung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geführt hat.[2] Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Klimasystems der Erde aus GARP 1975, wie sie seither in leicht modifizierter Form (z.B. Hantel 1989, S. 1) weite Verbreitung gefunden hat. Allerdings vollziehen sich in dem skizzierten System nicht nur die klimabildenden Prozesse, sondern auch alle Wettervorgänge, also atmosphärische Zustände und Prozesse die, wie eingangs dieses Abschnittes dargelegt, erst in ihrer statistischen Gesamtheit das Klima ausmachen. Das legt den ebenfalls in Gebrauch befindlichen Begriff des „Erdsystems" nahe, zumal es sich um ein planetares System handelt, das den gesamten oberflächennahen Erdkörper einschließlich der Atmosphäre umfasst und das sowohl aus dem Erdinneren (Vulkanismus, Plattentektonik, geothermischer Wärmefluss), als auch aus dem kosmischen Raum (solarer und kosmischer Strahlungs- und Partikelfluss) beeinflusst wird.

Überlegungen zu Komplexität und Einfachheit dieses Systems sollen im Folgenden getrennt für das Subsystem Atmosphäre unter dem speziellen Gesichtspunkt der Wettervorhersage und für das Gesamtsystem unter dem Aspekt des Klimawandels betrachtet werden.

---

2 Zur Historie vgl. Bernhardt 2007, S. 73–74, Bernhardt 2009, S. 130–131 sowie speziell zum Weltklimaprogramm Hupfer 1991, Abschnitt 1.2.

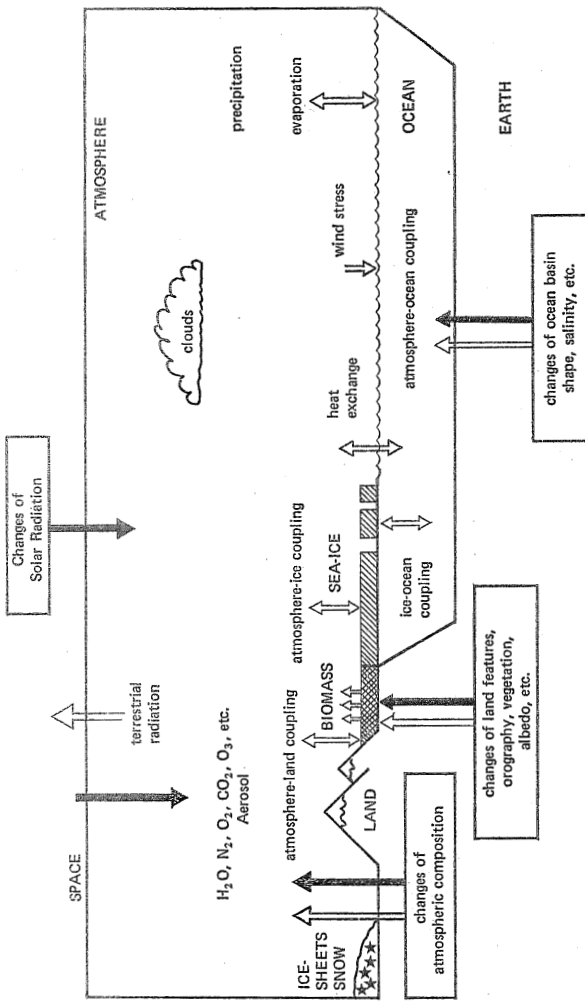

Abb. 2: Schematische Darstellung des Klimasystems der Erde sowie externer (ausgefüllte Pfeile) und interner (offene Pfeile) Antriebe von Klimaänderungen (nach Garp 1975, S. 14)

3. Das Subsystem Atmosphäre und das Problem der Wettervorhersage

Während die Veränderlichkeit des Klimas und speziell die Voraussicht auf das künftige Klima kaum vor dem 19. Jahrhundert als wissenschaftliches Problem erkannt wurde, zeugen überlieferte Wetterregeln seit der Antike von dem immerwährenden Bedürfnis nach einer Voraussicht auf das kommende Wetter. (Wegen Einzelheiten sei auf die bereits zitierten meteorologiegeschichtlichen Werke von Schneider-Carius, Khrgian und Körber verwiesen). Die Möglichkeit einer Wettervorhersage auf wissenschaftlicher Grundlage wurde dabei – besonders im Vergleich zur Astronomie – im Laufe der Jahrhunderte durchaus kontrovers beurteilt (vgl. z.B. Bernhardt 1998). Humboldt neigte auf Grund seiner tiefen Einsicht in die Komplexität des Klima/Erdsystems zur Skepsis, wenn er im „Kosmos“ den „meteorologischen Theil des Naturgemäldes“ mit der Feststellung beschloss, „daß jeder einzelne meteorologische Proceß durch alle anderen gleichzeitigen modificirt wird und fortfuhr:

> „Diese Mannigfaltigkeit der S t ö r u n g e n“ ... erschwert die Deutung der verwickelten meteorologischen Erscheinungen; sie beschränkt und macht größtentheils unmöglich die V o r h e r b e s t i m m u n g atmosphärischer Veränderungen, welche für den Garten- und Landbau, für die Schifffahrt, für den Genuß und die Freuden des Lebens so wichtig wäre. Diejenigen, welche den Werth der Meteorologie nicht in der Kenntniß der Phänomene selbst, sondern in jene problematische Vorherbestimmung setzen, sind von der festen Ueberzeugung durchdrungen, daß der Theil der Naturwissenschaft, um den so viele Reisen in ferne Berggegenden unternommen worden sind, die Meteorologie, sich seit Jahrhunderten keiner Fortschritte zu rühmen habe.“(Vgl. Bernhardt 2003, insbesondere S. 219f.)

Zwei Jahrzehnte vorher hatte Goethe in seinem zu Lebzeiten unveröffentlicht gebliebenen „Versuch einer Witterungslehre“ (1825) auf seiner Suche nach dem „Grundphänomen“ des Witterungsgeschehens bemerkt,

> „daß alles was ist oder erscheint, dauert oder vorübergeht, nicht ganz isolirt, nicht ganz nackt gedacht werden dürfe; eines wird immer noch von einem anderen durchdrungen, begleitet, umkleidet, umhüllt; es verursacht und leidet Einwirkungen, und wenn so viele Wesen durch einander arbeiten, wo soll am Ende die Einsicht, die Entscheidung herkommen, was das Herrschende, was das Dienende sei, was voranzugehen bestimmt, was zu folgen genöthigt werde?“ (Vgl. Bernhardt 2000)

Im Sinne der Ausführungen am Ende der Vorbemerkungen zum vorliegenden Aufsatz bot sich in der von Humboldt und Goethe beklagten Situation im Hinblick auf die Vorherbestimmung des Zustandes des Subsystems Atmosphäre („Wettervorhersage“) zunächst die Suche nach „einfachen“ Regeln an, die entweder den Verlauf des Wetters an einem festen Ort (lokale Methode) oder den Zustand der Atmosphäre zu einem festen Zeitpunkt über einem gegebenen Gebiet (synoptische Methode) – also räumliche oder zeitliche Strukturen des komplexen Subsystems Atmosphäre – zum Gegenstand haben sollten.

Goethe selbst sah sich auf der Suche nach dem „Grundphänomen“ des Witterungsgehens mit der Gefahr pauschaler Vereinfachung konfrontiert, wenn er 11. April 1827 im Gespräch mit Eckermann seinen starken „Glauben an das Barometer“ betonte, aber später fortfuhr:

> „Die Sache ist sehr einfach, und so am Einfachen, Durchgreifenden halte ich mich und gehe ihm nach, ohne mich durch einzelne Abweichungen irreleiten zu lassen. Hoher Barometer: Trockenheit, Ostwind; tiefer Barometer: Nässe, Westwind – dies ist das herrschende Gesetz, woran ich mich halte. Wehet aber einmal bei hohem Barometer und Ostwind ein nasser Nebel her, oder haben wir blauen Himmel bei Westwind, so kümmert mich dies nicht und macht meinen Glauben an das herrschende Gesetz nicht irre, sondern ich sehe daraus bloß, daß auch manches Mitwirkende existiert, dem man nicht sogleich beikommen kann.“

Zwei Jahre später, am 13. Februar 1829 beklagte er aber dem gleichen Gesprächspartner gegenüber resignierend, dass der Mensch der notwendigen Synthese der „Gegenstände der Meteorologie“ nicht gewachsen sei, da „der Mitwirkungen ... so mannigfaltige“ seien und er sich daher „in seinen Beobachtungen und Forschungen unnütz abmühet.“ Und wenig später, am 3. März des gleichen Jahres schrieb er an Zelter:

> „Das Studium der Witterungslehre geht, wie so manches Andere, nur auf Verzweiflung hinaus ... Hier wie überall verdrießt es die Leute, dass sie dasjenige nicht erlangen, was sie wünschen und hoffen, und da glauben sie gar nichts empfangen zu haben. Man müßte z.B. vor allen Dingen auf das Vorauswissen und Prophezeyen Verzicht thun, und wem ist das zuzumuthen.“ (Zum Nachweis der Zitate vgl. Bernhardt 2000.)

Sein Scheitern bei der Suche nach einem einfachen Grundgesetz für das Witterungsgeschehen im komplexen Atmosphärensystem mündete schließlich in einem Schreiben Goethes vom 24. Februar 1832 – einen Monat vor seinem Tod – an H. L. F. Schrön, den Leiter der Sternwarte Jena und der von Goethe eingerichteten Meteorologischen Anstalten des Großherzog-

CCD_61055-2-Inhalt

tums Sachsen-Weimar-Eisenach, einem seit dem Jahre 1817 bestehenden Stationsnetz (Goethe, LA S 626–630), in dem die Einstellung aller Beobachtungen verfügt wurde, da „fernerhin, auf diesem Wege, vorerst nichts weiter zu erreichen sei..." (Goethe, LA S. 619, 626–630).

Die ganzheitlich „denkende Betrachtung der Empirie" im Sinne Humboldts hatte zwar zum Erkennen komplexer Systeme, wie des Klimasystems der Erde und seiner Subsysteme, aber selbst für das allgegenwärtige Teilsystem der Atmosphäre nicht zu der von Goethe gewünschten, aber für ein dauernd „unentdecktes Land" gehaltenen Synthese geführt. Dazu bedurfte es zunächst der empirischen Untersuchung einfacher räumlich-zeitlicher atmosphärischer Strukturen und im Weiteren der analytischen Methode der modernen Naturwissenschaft. So entwickelte Heinrich Wilhelm Dove (1803–1879), von der lokalen Methode, insbesondere den von Leopold v. Buch (1774–1853) eingeführten barometrischen Windrosen ausgehend, zur einfachen Beschreibung des Witterungsablaufs in Mitteleuropa mit dem Drehungsgesetz der Winde und der Vorstellung des Kampfes von Polar- und Äquatorialstrom Paradigmen der atmosphärischen Dynamik, die von Humboldt hoch geschätzt wurden (hierzu und zu dem folgenden ausführlich Bernhardt 2008). Die offenbar in Beziehung zur Naturphilosophie Hegels und Schellings (vgl. Fritscher 2005) zu setzende phänomenologisch begründete Vorstellung einer Entstehung der Stürme aus dem „Kampf" unterschiedlich temperierter Luftströme hat die zeitgenössische Meteorologie, insbesondere in ihren Versuchen einer wissenschaftlich begründeten Wettervorhersage, z.B. durch Robert Fitz Roy (1805–1865), zweifellos befördert.

Der Übergang der Meteorologie von einer beobachtenden und beschreibenden zu einer messenden und berechnenden Wissenschaft der Atmosphäre vollzog sich auf der Grundlage der klassischen Physik, insbesondere der Thermo- und Hydrodynamik. Protagonisten dieser Entwicklung im deutschsprachigen Raum waren insbesondere H. v. Helmholtz (1821–1894), W. v. Bezold (1837–1907) und J. v. Hann (1839–1921) (zu Helmholtz vgl. Bernhardt 1973; Hörz 1997). Als Marksteine in der Physik der Atmosphäre gelten das barische Windgesetz, die um 1860 von H. D. Buys-Ballot (1817–1890) auf empirischem Weg gefundene und von W. Ferrel (1817–1891) theoretisch abgeleitete lineare Beziehung zwischen horizontalem Luftdruckgradienten und (großräumiger, beschleunigungsfreier) Strömung, sowie J. v. Hanns thermodynamische Föhntheorie (1866/67). Dabei blieb die „praktische Meteorologie", die (kurzfristige) Vorausbestimmung des Wetters, zunächst Isobarenmeteorologie, die Veränderungen des Wetters aus Verände-

rungen der Luftdruckverteilung herzuleiten suchte (z.B. Mohn 1883, S. 341f.).

Die von V. Bjerknes (1862–1951) gegen Ende des Ersten Weltkrieges inaugurierte Polarfronttheorie (zur Entstehungsgeschichte vgl. Scherhag 1948, S. 5; Nebeker 1995, S. 56) bot auf der Grundlage der synoptischen Methode mit der Beobachtung und der prognostischen Verfolgung empirisch erfasster und theoretisch erklärbarer „einfacher“ Strukturelemente, wie der Fronten und Luftmassen, im Subsystem Atmosphäre über ein halbes Jahrhundert ein Werkzeug für brauchbare Wettervorhersagen auf einige Tage im voraus. Datenbasis waren ein weltweites Beobachtungsnetz von Bodenstationen sowie eine zunehmende Anzahl von aerologischen Aufstiegsstellen (Wettererkundungsflüge und vor allem Radiosondierungen). Als tägliches Arbeitsmaterial dienten umfangreiche Tabellenwerke und Diagramme, einfache analytische Verfahren und eine Vielzahl teils rein empirisch gefundener, teils theoretisch mehr oder minder gut begründeter Regeln. So enthält das in mehreren Auflagen erschienene Lehrbuch von Chromow 1942, das neben dem von Scherhag 1948 als Zeugnis für diese Phase der synoptischen Meteorologie gelten kann, am Ende nicht weniger als 177 „synoptische Regeln“ über Luftmassen, Fronten, die Bewegung der Zyklonen und Antizyklonen und die Druckänderungsgebilde (S. 450ff.).

Der Übergang zur modernen Wettervorhersage durch näherungsweise Integration der grundlegenden thermohydrodynamischen Gleichungen war zwar bereits von V. Bjerknes und anderen (vgl. Nebeker 1995, S. 49f.) noch vor dem Entwurf und der praktischen Anwendung der Polarfronttheorie konzipiert worden („Bjerknes-Programm“), wurde aber erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts vollzogen. (Eine instruktive Rückschau nach 50 Jahren bietet hierzu der Sammelband Deutsche Meteorologische Gesellschaft 2000.) Die operative Verwendung der „governing equations“ im operationellen Vorhersageprozess bezeichnet mit dem Rückgriff auf nicht weiter zurückführbare elementare Wirkbeziehungen der atmosphärischen Thermohydrodynamik zugleich ein Element der Einfachheit im Erkenntnisprozess.

„Einfachheit“ kommt aber noch in anderer Hinsicht ins Spiel: Die genannten Bewegungsgleichungen beschreiben atmosphärische Bewegungsgleichungen aller Skalen bis herab zu Schallschwingungen. Um die letzteren aus dem Rechenprozess zu eliminieren, wurden als „gefilterte“ Gleichungen zunächst aus den Grundgleichungen abgeleitete Wirbelgleichungen für beschleunigungsarme, „quasigeostrophische“ Bewegungen verwendet.

Diese Gleichungen können mittels Greenscher Funktionen (Einflussfunktionen) gelöst werden, was die Darstellung der für das Wettergeschehen wichtigen Luftdruck- und Lufttemperaturänderungen sowie der atmosphärischen Vertikalbewegungen als Funktionen der Temperatur- und Wirbeladvektion ermöglicht – also eine Beschreibung wetterwirksamer Prozesse nicht, wie vorher, mittels empirisch gewonnener Regeln, sondern durch die Lösung vereinfachter Gleichungen. (Ausführliche Darstellung bei Marchuk 1967, insbesondere Kapitel 2). Auf den nachfolgenden Übergang zur Lösung der vollständigen Gleichungen („primitive“ equations zu verstehen als „ursprüngliche“, nicht als „einfache“ Gleichungen!) soll hier unter Verweis auf den oben zitierten Jubiläumsband aus dem Jahr 2000 nicht näher eingegangen werden.

Dagegen soll abschließend unter dem Gesichtspunkt der Einfachheit noch auf Ähnlichkeitstheorie und Dimensionsanalyse verwiesen werden, die im Studium, in der Beschreibung und in der Modellierung der atmosphärischen (Thermo-, Hydro-)Dynamik eine beträchtliche Rolle spielen. So beschreibt die seit langem bekannte Reynoldssche Zahl das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften in einer Strömung, dessen kritischer Zahlenwert die Grenze zwischen laminarem und turbulentem Strömungsregime bezeichnet, wobei sich die Flüsse von Beimengungen, Wärme und Impuls in der laminaren Strömung in einfacher Weise als Produkt der zugeordneten Eigenschaftsgradienten mit quasikonstanten molekularen Transportkoeffizienten (Diffusions-, Wärmeleitungs-, Zähigkeitskoeffizienten) ergeben. Im Falle einer turbulenten Strömung treten an die Stelle der molekularen turbulente Transportkoeffizienten (Turbulenz- oder „Austausch“koeffizienten bzw. -tensoren), die ihrerseits von Strömungs- und Schichtungsparametern abhängen.

Einfache Zusammenhänge der letztgenannten Art bestehen in Erdbodennähe und werden – ein weiteres Instrument der Ähnlichkeitstheorie – durch universelle Funktionen dimensionsloser Koordinaten beschrieben. So beschreibt die Monin-Obuchovsche Ähnlichkeitstheorie (z.B. Foken 2003, S. 42ff.) die vertikalen Profile des Turbulenzkoeffizienten sowie von Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchte als Funktion der dimensionslosen Höhe z/L über der Erdoberfläche, wobei die Monin-Obuchovsche Länge L plausibel physikalisch begründet und interpretiert werden kann (Bernhardt 1995). Ein Vergleich der von der Monin-Obuchovschen Ähnlichkeitstheorie in Abhängigkeit insbesondere von der thermischen Schichtung gelieferten Profile mit der Vielzahl entsprechender empirischer oder theoretisch unzureichend begründeter Ansätze aus den Jahren bis zur Mitte

des 20. Jahrhunderts illustriert an einem speziellen Beispiel die Fruchtbarkeit des Prinzips der Einfachheit.

Weitere Ähnlichkeitszahlen, die neben der Reynoldsschen Zahl in der atmosphärischen Dynamik umfassend verwendet werden, hat Foken a.a.O., S. 26ff. zusammengestellt.

4. Das Klimasystem und die Diskussion des Klimawandels

Überlegungen zu Komplexität und Einfachheit des Klimasystems in Hinblick auf das Verständnis des Klimawandels erfordern die Betrachtung des Zeitbereiches jenseits des synoptischen Scales, d.h. von etwa 10^6 s an aufwärts, und die Einbeziehung aller Teilsysteme einschließlich ihrer vielfältigen nichtlinearen Wechselwirkungen, auf Grund deren das Klima ständigen Schwankungen in den unterschiedlichsten Zeitbereichen unterliegt und der Klimawandel der Normalzustand, gewissermaßen die Daseinsweise des Klima ist.

Abbildung 3 nach GARP 1975, vermittelt eine Vorstellung über Antriebe von Klimaänderungen im Zeitbereich von einem bis zu einem Gigajahr (vgl. auch Kutzbach 1974 sowie Kutzbach/Bryson 1974), wie sie bereits in den ersten Jahren des Globalen Atmosphärischen Forschungsprogramms bestand.

Bei den Versuchen zur Simulation des Klimas der Gegenwart und in Vergangenheit und Zukunft mittels Modellen der allgemeinen Zirkulation (CGMs) finden im Prinzip die gleichen, im vorangegangenen Abschnitt charakterisierten, auf einfache physikalische Wirkprinzipien zurückführbaren Gleichungen Verwendung wie in der numerischen Wettervorhersage, allerdings von vornherein gekoppelt für Ozean und Atmosphäre und nicht mit dem Anspruch einer illusionären „Wetter“prognose auf Jahre oder Jahrzehnte im voraus, sondern als Lieferanten umfangreicher Ensembles atmosphärischer Zustände, die in ihrer statistischen Gesamtheit das zu simulierende Klima darstellen. Vor allem aber basieren numerische Experimente zur Simulation des Klimawandels auf der Verwendung zeitlich veränderlicher Rand- bzw. langzeitig variabler Anfangsbedingungen, z.B. an der Erdoberfläche und an der Atmosphärenobergrenze bzw. in der Zusammensetzung der Lufthülle und des Meerwassers, womit, wie eingangs dieses Abschnittes bereits bemerkt, alle Komponenten des Klimasystems ins Spiel kommen. Das betrifft insbesondere die „Chemie des Klimasystems“ (Möller 2010), aber gleichermaßen die Biosphäre, die über Veränderungen der Albedo der Erdoberfläche sowie des Stoff- und Partikelhaushaltes der Atmosphäre („Treibhaus“gase bzw. Aerosole) in den globalen Strahlungshaushalt eingreift.

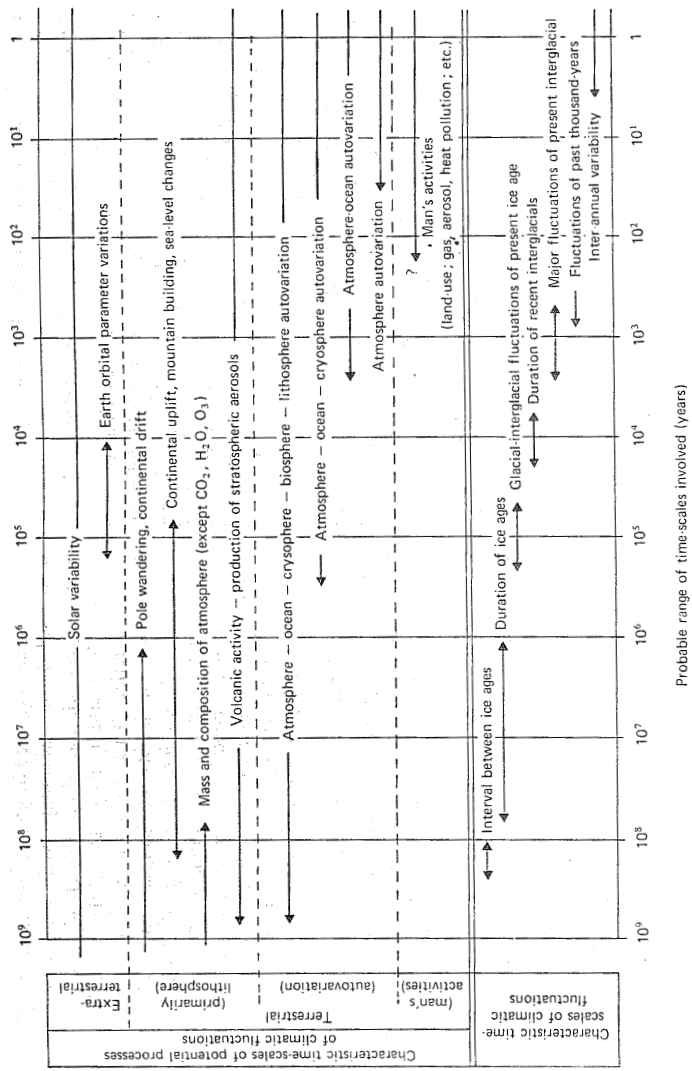

Abb. 3: Antrieb von Klimaänderungen in unterschiedlichen Zeitbereichen (nach GARP 1975, S. 9, entnommen der Arbeit von Kutzbach 1974)

Das höchst komplizierte Zusammenspiel von externen Antrieben und systeminternen Schwankungen in einem durch zahlreiche positive wie negative Rückkoppelungen gekennzeichneten komplexen System – einige Überlegungen dazu für den Klimawandel der Gegenwart sind bei Bernhardt 2015 vorgestellt – lässt wenig Raum für eine Erfolg versprechende Konzeption der Einfachheit in der Beschreibung des Klimasystems und des zu erwartenden Klimawandels im Zeitbereich von Jahrzehnten bis Jahrhunderten. Insbesondere sind keine zu den im vorangegangen Abschnitt erwähnten, zunächst auf empirischem Wege aufgefundenen räumlichen synoptischen Strukturen (Zyklonen und Antizyklonen, Fronten, Luftmassen) analoge Zeitstrukturen auffindbar, vom Jahres- und Tagesgang meteorologischer Elemente einmal abgesehen. Vermeintliche Perioden in den Klimaschwankungen, wie z.B. eine 35jährige „Brücknersche“ Periode, wurden im Zeitalter der klassischen Klimatologie in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ausgiebig diskutiert (z.B. Knoch 1930, Abschnitt VI), und „Weather Cycles – Real or Imaginary?“ (Burroughs 2003) bezeichnen eine auch noch im 21. Jahrhundert aktuelle Fragestellung, aber alle Erfahrungen zeigen, dass Periodizitäten kein einfaches Wirkprinzip des Klimawandels darstellen.

Auch die bekannten Milankovich-Zyklen der quasiperiodischen Veränderungen der Erdbahnelemente werden zwar als Taktgeber für die Aufeinanderfolge der Kalt- und Warmzeiten (Glaziale und Interglaziale) im gegenwärtigen Eiszeitalter angesehen, können aber diese Rolle offensichtlich nur bei Bestehen interner Selbstverstärkungseffekte (positiver Rückkoppelungen) im Klimasystem der Erde, in erster Linie der Temperatur/Albedo-Rückkoppelung auf einer teilweise schnee- und eisbedeckten Erde spielen.

Das Trugbild vermeintlich einfacher Zusammenhänge ist Quelle zahlreicher Irrtümer in der Klimadebatte, vor allem auf Seiten der „Klimaskeptiker“, die teils die globale Erwärmung in den letzten Jahrzehnte insgesamt, teils den anthropogenen Anteil an ihr leugnen, teils ihre Auswirkungen für wenig nachteilig halten bzw. eine Erwärmung, wenn sie denn existierte, für vom Menschen unbeeinflussbar und keiner „mitigation“ zugänglich erklären. Das Argument, die seit Jahrzehnten monotone oder annähernd lineare Zunahme der „Treibhausgas“konzentration (CO_2, CH_4, N_2O) in der Atmosphäre könne nicht Ursache eines schubweise verlaufenden Temperaturanstieges an der Erdoberfläche sein, der sich seit Ende der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts deutlich verlangsamt habe oder sogar zum Stillstand gelangt sei („Hiatus“), postuliert einen monokausalen einsinnigen Zusammenhang zwischen Treibhausgaskonzentration und Temperatur an der Erdoberfläche

und ignoriert damit die für das komplexe Klimasystem fundamentalen vielfältigen internen Wechselwirkungen und nichtlinearen Zusammenhänge.

Abwegig ist die Leugnung globaler Trends unter Verweis auf regionale Witterungsanomalitäten oder -extreme, die in Wahrheit Folge von Schwankungen der atmosphärischen (bzw. der atmosphärisch-ozeanischen) Zirkulation sind. Ein drastisches Beispiel war die Debatte um die winterlichen Witterungsverhältnisse in Teilen Europas und der USA im Dezember des Jahres 2010, dem in den Messreihen seit 1850 gemeinsam mit den Jahren 1998 und 2005 bis dahin weltweit wärmsten Jahr, zu der wir seinerzeit Stellung genommen haben (Bernhardt 2012). Der damals bereits hervortretende, über Veränderungen der Strömungsverhältnisse vermittelte Zusammenhang zwischen dem Rückgang der sommerlichen Meereisbedeckung in bestimmten arktischen Regionen und dem Auftreten kälterer Winter über Teilen Europas und Nordamerikas (auch aus der Klimageschichte bekannt!) wurde seither durch zahlreiche numerische Modellexperimente wie auch durch empirisch-statistische Untersuchungen bestätigt (z.B. Wegmann et al. 2015).

Dass die „globale Erwärmung“ – der Anstieg der mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche – im komplexen Klimasystem zeitlich ungleichmäßig und räumlich differenziert erfolgt, ist seit langem bekannt, der aktuelle Stand nach dem fünften IPCC-Sachstandsbericht z.B. bei Bernhardt 2014, Abb. 2a, 2b, S. 18 wiedergegeben (vgl. auch den zusammenfassenden Synthesebericht IPCC 2014, Fig. 1.1, S. 41). Prophezeiungen einer neuen „kleinen Eiszeit“ unter Berufung auf markante Kälteperioden, wie sie z.B. auf dem nordamerikanischen Kontinent immer wieder auftreten, sind nicht nur Beispiele für unzulässige Vereinfachungen, sondern einfach unsinnig! Wohl aber dürfte der im Rahmen der regional unterschiedlichen Klimaerwärmung verstärkte Temperaturanstieg im Nordpolargebiet („arctic amplification“) über Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation mit einer erhöhten Häufigkeit extremer Witterungsereignisse in mittleren Breiten – einschließlich des Auftretens strenger Winter – verknüpft sein (z.B. Cohen et al. 2014).

Die für die Vergangenheit konstatierte und in Zukunft zu erwartende veränderte Häufigkeit im Auftreten extremer Witterungsereignisse (IPCC 2013, p. 46f., p. 109f.) ist generell an Veränderungen der ozeanisch-atmosphärischen Zirkulation und nicht in erster Linie an unmittelbare Auswirkungen im Zuge des Klimawandels veränderter Strahlungsflüsse geknüpft, so plausibel (und „einfach“) auch lokale Zusammenhänge zwischen erhöhter Gegenstrahlung am Erdboden und erhöhten Nachttemperaturen bzw. er-

höhter Häufigkeit und Andauer von Hitzewellen auch sein mögen. Das gleiche gilt für die höhere Intensität konvektiver Ereignisse in einer wasserdampfreicheren (weil wärmeren) Atmosphäre mit stärkerer vertikaler Temperaturabnahme.

Als letztes Beispiel einer unzulässigen Vereinfachung bei der Analyse des Klimasystems und der Untersuchung des derzeitigen Klimawandels seien die einseitige Betonung solarer Variationen und insbesondere die Leugnung anthropogener Einflüsse, angeführt, etwa im Sinne des apodiktischen Buchtitels „Die Natur, nicht menschliche Aktivität, bestimmt das Klima“ (Singer 2008). Natürlich ist die Sonneneinstrahlung die bei weitem dominierende Energiequelle für alle atmosphärischen Bewegungen, ihre Verteilung über die Erdkugel in Raum und Zeit der entscheidende Faktor für die Ausbildung von Tages- und Jahreszeiten wie für die Anordnung der Klimazonen an der Erdoberfläche, und selbst geringfügige Veränderungen der Erdbahnelemente (Milankovich-Zyklen) können auf dem Weg kleiner Modifikationen der solaren Einstrahlung und ihrer geographischen Verteilung im Jahresverlauf tiefgreifende klimatische Konsequenzen (z.B. Warm- und Kaltzeiten) nach sich ziehen.

Selbstverständlich gehören Schwankungen der solaren Strahlung neben wechselnder Vulkanstaubtrübung der Atmosphäre zu den entscheidenden natürlichen Antrieben des Klimawandels in historischer Zeit, besonders in der vorindustriellen Ära. Der Versuch einer Rekonstruktion für das letzte Jahrtausend auf der Nordhalbkugel ist in IPCC 2013, Box TS.5, Fig.1, p. 78 unternommen worden, wiedergegeben auch bei Bernhardt 2014, Abb. 4, S. 20. Es wäre ein letztes Beispiel ungerechtfertigter Vereinfachung, diese Entwicklung eines wesentlich naturgetriebenen Klimawandels ungeachtet dessen unverändert fortzuschreiben, dass die Verbrennung in Jahrmillionen angehäuften fossilen Kohlenstoffs binnen zweier Jahrhunderte samt weiterer Eingriffe in den globalen Stoffhaushalt der Atmosphäre die Konzentration für den Strahlungshaushalt des Klimasystems wesentlicher Spurengase (CO_2, CH_4, N_2O) höher als irgendwann zumindest in den letzten 800.000 Jahren ansteigen lassen hat!

Eine Folge dieses schwerwiegenden anthropogenen Eingriffs in den globalen Stoff- und Energiehaushalt ist die seit einem Jahrzehnt genauer bekannte Imbalance des Klimasystems – die Differenz zwischen einfallender minus reflektierter und rückgestreuter kurzwelliger solarer sowie emittierter langwelliger irdisch-atmosphärischer Strahlung an der Atmosphärenobergrenze –, die für den Zeitraum von 1971 bis 2010 auf im Mittel 0,42 W/m^2 veranschlagt wurde (IPCC 2013, p. 39), was ca. 0,12% der solaren Einstrah-

CCD_61055_61055 - Sig003 - Inhalt_FB 002 - Schöndruck - DBg_2 - 22.01.2016 - Black

lung von 340,25 W/m^2 (mit einer Total Solar Irradiance [TSI] von 1361 W/m^2) entspricht. Eine Aktualisierung und Aufschlüsselung nach Monatsmittelwerten für den Zeitraum von 2001 bis 2012 (Kratz et al. 2014) zeigt Ausschläge der Imbalance-Monatsmittel bis ca. +/– 2 W/m^2 bei einer mittleren interanuellen Variabilität von gerundet +/– 0,70 W/m^2, die für die ausgehende langwellige Strahlung +/– 0,50 W/m^2, +/– 0,40 W/m^2 für die reflektierte, aber nur +/– 0,20 W/m^2 für die einfallende Sonnenstrahlung beträgt.

Diese Strahlungsimbalance an der Atmosphärenobergrenze – eine an Bord von Satelliten kontinuierlich messbare Größe – stellt einen im Sinne einer Verknüpfung mit fundamentalen physikalischen Prinzipien (erster Hauptsatz) „einfachen“ Parameter zur Kennzeichnung eines „global heating“ des gesamten Klimasystems dar, das über das „global warming“ – die Erhöhung der mittleren globalen Lufttemperatur an der Erdoberfläche – hinausgeht. Nach den Angaben in IPCC 2013, p. 39 (auch Bernhardt 2014, Abschnitt 3, 2015, S. 4) finden sich im Zeitraum der letzten Jahrzehnte nur ca. 1% dieses Energieüberschusses in einer Erwärmung der Atmosphäre wieder, während ca. 96% (93% ± 3%) in die Erwärmung des Ozeans fließen bzw. für das Abschmelzen der Gletscher und der polaren Eisschilde verbraucht werden – beides Prozesse, die für den globalen Meeresspiegelanstieg verantwortlich sind, der sich sehr viel gleichförmiger (und in den letzten Jahrzehnten beschleunigt) vollzieht als der Anstieg der mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche. Der weitere Verlauf des Klimawandels wird demzufolge entscheidend von den systeminternen Prozessen beeinflusst, die die Wärmeumverteilung zwischen Hydro, Kryo- und Atmosphäre bestimmen, aber auch (über die Veränderung der vertikalen Temperatur- und Feuchteverteilung sowie des Wolkenregimes in der Atmosphäre) auf die Strahlungsimbalance an der Atmosphärenobergrenze selbst einwirken.

Eine Analyse des in gewissem Sinn „einfachen“ Energiebudgets des globalen Klimasystems (vgl. auch IPCC 2013, p. 67f.) führt also sofort wieder zu Prozessen von hoher Komplexität – insbesondere in der Wechselwirkung von externen Antrieben und systeminternen Schwankungen (dazu Bernhardt 2014) –, die die Klimazukunft der Erde entscheidend mitbestimmen. Eine Abschätzung des kumulativen Verlaufs der Strahlungsimbalance, ihrer wichtigsten Verursacher (lang- und kurzlebige Treibhausgase, solare Schwankungen, troposphärische und vulkanische Aerosole, Landnutzung) sowie des Verbleibs des Energieüberschusses für den Zeitraum 1970 bis 2011 wurde bereits in IPCC 2013, p. 67f. präsentiert.

Auf der Suche nach weiteren Elementen der Einfachheit im Klimasystem und bei dem Versuch der Aufstellung von Szenarien des künftigen Klimawandels oder womöglich sogar der Einflussnahme auf die weitere Klimaentwicklung bleibt schließlich noch die Schaffung von Voraussetzungen für Einfachheit durch die Definition geeigneter abgeleiteter, nicht notwendig selbst einfacher Parameter (vgl. dazu Sommerfeld 2010) übrig. Solche Kenngrößen des globalen Klimawandels sind der Strahlungsantrieb („radiative forcing“) und die Klimasensitivität (climate sensitivity). Es handelt sich dabei, grob gesagt, um die Veränderung der globalen Strahlungsbilanz im Troposphärenniveau infolge natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren gegenüber der vorindustriellen Epoche (Bezugsjahr 1750) bzw. um den bei einer Verdoppelung der CO_2-Konzentration zu erwartenden Anstieg der bodennahen globalen Mitteltemperatur. (Näheres dazu bei Rahmstorf, Schellnhuber 2007, Kapitel 2, aktualisiert in IPCC 2013, p. 53ff., p. 82ff. bzw. bei Bernhardt 2014, Absatz 4).

Unter Verwendung dieser Parameter wurden bereits in früheren IPCC-Sachstandsberichten unter der Annahme verschiedener, von der gesellschaftlichen und technologischen Entwicklung abhängiger Szenarien künftiger Treibhausgasemissionen Projektionen für die Veränderung der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche und den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg vorgestellt (z.B. Klimaänderung 2007, S. 8ff., S. 48ff.). Auf dieser Grundlage wurde auch das viel diskutierte, auf der Weltklimakonferenz in Cancun im Jahre 2010 erstmals international anerkannte Ziel formuliert, die globale Erwärmung auf 2°C gegenüber der vorindustriellen Ära zu beschränken (z.B. Rahmstorf/Schellnhuber 2007, Kapitel 5, Schellnhuber 2011). Dabei kann auch die maximal zulässige Menge fossilen Kohlenstoffs angegeben werden kann, die noch verbrannt werden darf, ohne dieses (oder ein zahlenmäßig anderes, als „Leitplanke“ dienendes) Begrenzungsziel für die anthropogen bedingte globale Erwärmung zu verfehlen.

Abweichend von den vorhergehenden Sachstandsberichten werden in IPCC 2013 (vgl. auch IPCC 2014, pp. 57ff. und die Erläuterungen bei Bernhardt 2014, Abschnitt 5) „Representative Pathways“ auf der Grundlage des für das Jahr 2100 angestrebten (bzw. noch tolerierten) Strahlungsantriebes definiert, denen sowohl noch zulässige kumulative CO_2-Emissionen, als auch zu erwartende Anstiege der globalen Mitteltemperatur, des pH-Wertes an der Meeresoberfläche und weitere Parameter zugeordnet werden können. Im Rahmen der genannten Szenarien können auch sozialökonomische, energiewirtschaftliche und Maßnahmen der Klimapolitik in die Simulationsexperimente einbezogen werden. So ist die Beschränkung des anthropogenen

Strahlungsantriebes auf 2,6 W/m^2 im Jahre 2100 gegenüber 2,3 W/m^2 im Jahre 2011 ohne drastische Emissionsminderungen nicht denkbar.

Diese Pfade in die Klimazukunft versprechen unter Verwendung konstruierter „einfacher“ Parameter, wie des Strahlungsantriebs, Aussagen über „einfache“, aber sicher schwer durchsetzbare Gestaltungsprinzipien für die künftige Entwicklung des Klimas im Erdsystem in aktiver Wechselwirkung natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren.

Abschließend soll ausdrücklich auf den Wahrscheinlichkeitscharakter all dieser Klimaprojektionen verwiesen werden. Bereits die Angaben über den Strahlungsantrieb und seine Komponenten für das Ausgangsjahr 2011 (IPCC 2013, p. 54, IPCC 2014, p. 45 bzw. Bernhardt 2014, S. 7f., 25) zeigen eine erhebliche Schwankungsbreite und werden auch in Form von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen präsentiert. Letzteres gilt erst recht für die Abschätzung der Klimasensitivität (IPCC 2013, p. 82ff.), die angesichts der weiter oben skizzierten komplexen Zusammenhänge zwischen Strahlungsimbalance des Klimasystems, die wiederum nur zu einem Teil von den anthropogenen Treibhausgasen bestimmt wird, und der globalen Mitteltemperatur nur den Charakter eines für einen längeren Zeitraum gültigen Mittelwertes haben kann.

Schließlich ist die Erstellung von Klimaprojektionen mittels Modellsimulationen nicht nur durch Differenzen zwischen den verwendeten Modellen und deren Simulationsergebnissen belastet, sondern auch durch die prinzipielle Schwierigkeit einer adäquaten Berücksichtigung natürlicher Einflussfaktoren auf das Klimasystem, die entweder schwer (Sonnenaktivität) oder praktisch gar nicht (Vulkaneruptionen) vorhersagbar sind.

Angesichts dieser Unwägbarkeiten künftiger Klimaentwicklung erscheint es aber umso dringlicher, speziell dessen anthropogenen Anteil weiter zu analysieren, der nach gegenwärtigem Erkenntnisstand „very likely“ mehr als die Hälfte des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche im Zeitraum von 1850 bis 2010 verursacht hat (IPCC 2014, p. 5) und der zugleich die Möglichkeit einer gezielten Einflussnahme auf den weiteren Klimawandel durch eine rationale Klimapolitik eröffnet – das Einfache, das schwer zu machen ist!

Die Suche nach Elementen der Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip im Klimasystem der Erde sollte dabei zumindest heuristisch fruchtbar sein.

Literatur

50 Jahre Weltraumforschung. Erforschung und Überwachung der Erde und des Weltraumes gestützt auf die Mittel der Raumfahrt. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 96 (2008), 217 S.

Bernhardt, K.: Der Beitrag Hermann von Helmholtz' zur Physik der Atmosphäre. Wiss. Z. d. Humboldt-Universität zu Berlin, Math.-Nat. Reihe XXII (1973), 331-340.

Bernhardt, K.: Aufgaben der Klimadiagnostik in der Klimaforschung. Gerl. Beitr. zur Geophys. 96 (1987), 113–126.

Bernhardt, K.: Zur Interpretation der Monin-Obuchovschen Länge. Meteorol. Z. 4 (1995), 81–82.

Bernhardt, K.: Wettervorhersage und Meteorologie als exakte Wissenschaft – Anmerkungen aus historischer Sicht. In: Schröder, W. E. (ed.): From Newton to Einstein. (A Festschrift in Honour of the 70th Birthday of Hans-Jürgen Treder). Mitteilungen des Arbeitskreises Geschichte der Geophysik in der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft 17 (1998), Heft 3–4, 26–37.

Bernhardt, K.: Goethe, die Meteorologie – und kein Ende? Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. 42 (2000)8, 109–125.

Bernhardt, K.: Alexander von Humboldts Beitrag zur Entwicklung und Institutionalisierung von Meteorologie und Klimatologie im 19. Jahrhundert. Algorismus, Heft 41, München 2003, S. 195–221.

Bernhardt, K.: Die Klimazukunft Europas. Forschungsinstitut der Internationalen Wissenschaftlichen Vereinigung Weltwirtschaft und Weltpolitik (IWVWW) e. V., Berichte 17. Jg., Nr. 176/177, Juli/August 2007, 73–87.

Bernhardt, K.: Heinrich Wilhelm Dove (1803–1879) und seine Stellung in der Geschichte der Berliner Meteorologie. Dahlemer Archivgespräche 14 (2008), 61–100.

Bernhardt, K.: Dialektik des Klimas. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 102 (2009), 123–137.

Bernhardt, K.: Klima im Wandel. http://www.leibniz-institut.de/archiv/bernhardt_01_02_12.pdf, 1–12

Bernhardt, K.: Johann Wolfgang von Goethe – Poet, Naturforscher und Witterungschronist am Ausgang der Kleinen Eiszeit. Ann. d. Meteorol. 46 (2013), 8–11.

Bernhardt, K.: Das Klimasystem der Erde im Licht des fünften IPCC-Sachstandsberichtes. http://www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2014/11/bernhardt.pdf, 1–30.

Bernhardt, K.: Zum Verhältnis von externen Antrieben und systeminternen Schwankungen im gegenwärtigen Klimawandel. http://www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2015/02/bernhardt.pdf, 1–5.

Burroughs, W. J.: Weather Cycles. Real or Imaginary? (2nd ed.). Cambridge Univ. Press 2003, 317 pp.

Chromow, S. P.: Einführung in die synoptische Wetteranalyse. Wien, Springer-Verlag 1942, 532 S.

Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumu, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., Jones, J.: Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. Nature geoscience, 17 August 2014, DOI: 10.1038/NGE02234, 627–637.

Deutsche Meteorologische Gesellschaft e. V.: 50th Anniversary of Numerical Prediction. Commemorative Symposium, 9–10 March, 2000. Rucksaldruck Berlin 2000, 255 S.

Ebeling, W.: Über das Gedächtnis des Zufalls – zur Dialektik von Gesetz und Zufall. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 118 (2014), 71–78.

Eckermann, Johann Peter: Gespräche mit Goethe in den letzten Jahren seines Lebens. Aufbau-Verlag, Berlin und Weimar 1982, 884 S.

Flohn, H.: Witterung und Klima in Mitteleuropa (2. Aufl.). S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1954, 214 S.

Foken, T.: Angewandte Meteorologie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003, 289 S.

Fortak, H.: Meteorologie. Dietrich Reimer Verlag, Berlin, 1982, 298 S.

Friedrich, J.: Ansätze zur Modellierung konvektiver Wolkenstrukturen mittels Zellulärer Automaten. Dipl.-Arb. Humboldt-Univ., Sektion Physik, Ber. Meteorol. u. Geophys., Berlin 1989, 53 S.ff., unveröff.

Fritscher, B.: The dialectic of the atmosphere: Heinrich Wilhelm Dove in Context. Algorismus 52 (2005), 91–102.

GARP: The physical basis of climate and climate modelling. WMO-ICSU Joint Organizing Committee , GARP Publ. Ser. 16 (1975), 265p.

Glossary of Meteorology. American Meteorological Society, Boston, sec. ed., 2000, 855 p.

Goethe, J. W. v.: Die Schriften zur Naturwissenschaft. Leopoldina-Ausgabe, Zweite Abt., Ergänzungen und Erläuterungen, Bd. 2, Hermann Böhlaus Nachf., Weimar, 2005.

Hantel, M.: Climate modelling. In: Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik, Neue Serie, Gr. V, Bd. 4, Meteorologie, Teilbd. c2, Springer-Verlag, Berlin etc., 1989, 1–116.

Hörz, H.: Helmholtz und die Meteorologie. Berlin-Brandenburg. Akad. d. Wiss., Wissenschaftshistorische Manuskripte 14(1997), 43 S.

Hörz, H.: Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 108 (2010), 11–36.

Hupfer, P. (Hg.): Das Klimasystem der Erde. Akademie Verlag, Berlin 1991, 464 S.

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. Migley (eds.)]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 1535 pp. Siehe auch http:/www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report of Working Groups I, II and III of the Fifth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Siehe auch http:/ar5-syr.ipcc.ch/

Keil, K.: Handwörterbuch der Meteorologie. Verlag Fritz Kapp, Frankfurt/Main, 604 S.

Khrgian, A. Kh.: Ocherki razvitiya meteorologii, Tom I, izd. vtor., Gidrometeoizdat, Leningrad 1959, 428 S.

Khrgian, A. Kh.: Meteorology. A Historical Survey, Vol. I, Keter Press, Jerusalem 1970, 387 S.

Khromov, S. P., Mamontova, L. I.: Meteorologicheskij slovar'. Izd. tret'e., Gidrometeoizdat, Leningrad 1974, 508 S.

Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Deutsche Übersetzung herausgegeben von der deutschen IPCC Koordinierungsstelle, Berlin, September 2008, 109 S.

Knoch, K.: Klima und Klimaschwankungen. Quelle & Meyer, Leipzig, 1930, 150 S.

Körber, H.-G.: Vom Wetteraberglauben zur Wetterforschung. Edition Leipzig, 1987, 231 S.

Kratz, D. P., Stackhouse, P. W., Jr., Wong, T., Sawaengphokai, P., Willer, A. C., Gupta, S. K., Loeb, N. G.: Earth radiation budget. Bull. Amer. Meteorol. Soc. 95 (2014) No. 7, Special Supplement, State of the climate in 2013, July 2014, 30–32.

Kutzbach, J.: Fluctuations of climate – monitoring and modelling. WMO Bull. 23(1974), 155–163.

Kutzbach, J. E., Bryson, R. A.: Variance spectrum of holocene climatic fluctuations in the north Atlantic sector. J. Atmosph. Sci. 31 (1974), 1958–1963.

Meyers Kleines Lexikon Meteorologie. Meyers Lexikonverlag, Mannheim, Wien, Zürich 1987, 496 S.

Marchuk, S. I.: Chislennye metody v prognoze pogody. Gidrometeoizdat, Leningrad 1967, 356 S.

Mohn, H.: Grundzüge der Meteorologie. Verl. Dietrich Reimer (3. Aufl.), Berlin, 1883, 359 S.

Möller, D.: Chemistry of the Climate System. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, Berlin, New York, 2010, 722 S.

Müller, R.: Montesquieu über Umwelt und Gesellschaft – die Klimatheorie und ihre Folgen. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. 80 (2005), 19–32.

Müller, S.: Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch? Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 108 (2010), 57–65.

Nebeker, F.: Calculating the Weather. Academic Press, San Diego etc. 1995, 251 p.

Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J.: Der Klimawandel (5. akt. Aufl.), C. H. Beck oHG, München 2007, 144 S.

Schellnhuber, H.-J.: Globaler Klimaschutz – eine unlösbare Aufgabe? Vortrag im Plenum der Leibniz-Sozietät am 13. Januar 2011. Bericht in Leibniz intern 51, 1. Juni 2011, S. 4.

Scherhag, R.: Wetteranalyse und Wetterprognose. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1948, 424 S.

Schneider-Carius, K: Das Klima, seine Definition und Darstellung: zwei Grundsatzfragen der Klimatologie. Veröff. d. Geophys. Inst. d. Karl-Marx-Univ. Leipzig, Bd. 17, 2 (1961), 222 S.

Schneider-Carius, K.: Wetterkunde, Wetterforschung. Verl. Karl Alber, Freiburg, München, 1955, 423 S.

Singer, F. (Hg.): Die Natur, nicht menschliche Aktivität, bestimmt das Klima. TvR Medienverlag GbR Jena, 2008, 98 S.

Sommerfeld, E.: Einfachheit – ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? Anregungen zur interdisziplinären Diskussion. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 108 (2010), 145–163.

Wegmann, M., Orsolini, Y., Vázquez, M., Gimeno, L., Nieto, R., Bulygina, O., Jaiser, R., Handorf, D., Rinke, A., Dethloff, K., Sterin, A., Brönnimann, S.: Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn. Environm. Res. Letters 10(2015)054015, 10 pp. doi:10.1088/1748-9326/10/5/054015.

CCD_61055_61055 - Sig003 - Inhalt_FB 002 - Widerdruck - DBg_2 - 22.01.2016 - Black