Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *102(2009), 123–157*

Karl-Heinz Bernhardt

Dialektik des Klimas

Einleitung

Vor nunmehr fast 44 Jahren besuchte ich erstmals eine Konferenz zur Erörterung philosophischer Probleme der Naturwissenschaften: Am 2. und 3. November 1964 fand in Berlin unter der Leitung von Hermann Ley (1911–1990), Direktor des Philosophischen Instituts der Humboldt-Universität, ein Symposium über „Gesetz und Bedingung in den technischen und Naturwissenschaften“ statt. Die Liste der Vortragenden weist von heutigen Mitgliedern unserer Sozietät Werner Ebeling, Rolf Löther und, natürlich, Herbert Hörz aus – damals Dozent am Institut für Philosophie, Abteilung Philosophische Probleme der modernen Naturwissenschaften. Sein Werk über den dialektischen Determinismus in Natur und Gesellschaft war in erster Auflage zwei Jahre vor der genannten Konferenz erschienen (Hörz 1962, vgl. auch Hörz 2008) und bildete einen Bezugspunkt für mehrere Beiträge.

Ich selbst setzte mich mit Gesetz und Bedingung in der Meteorologie auseinander, darunter mit dem Problem der Vorhersagbarkeit (Bernhardt 1965), insbesondere in Hinblick auf die damals noch in einem frühen Entwicklungsstadium begriffene und durchaus kontrovers beurteilte numerische Wettervorhersage – die Vorausberechnung künftiger atmosphärischer Zustände durch näherungsweise Integration der die Prozesse beschreibenden thermohydrodynamischen Gleichungen. Wettervorhersage galt der öffentlichen Wahrnehmung in jener Zeit noch immer, wie seit den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts, als die Aufgabe und Daseinsberechtigung der Meteorologie schlechthin, die vielfach mit „Wetterkunde“ gleichgesetzt wurde.

Die Thematik meines Plenarvortrages über „Die Zukunft des globalen Klimas – Unsicherheiten und Risiken“ mehr als ein Vierteljahrhundert später, am 9. April im „verdrängten Jahr“ 1992 (Klinkmann, Wöltge 1999, S. 80-81), entsprach einem in der Zwischenzeit gebieterisch in den Vordergrund getretenen Forschungsgegenstand der Meteorologie von weltweiter gesellschaftlicher Relevanz. Auf den Tag genau einen Monat nach dieser letzten

Plenarveranstaltung der Gelehrtengesellschaft der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR in ihren angestammten Räumen wurde am 9. Mai 1992 in New York die „United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC“ verabschiedet – eine UNO-Rahmenkonvention, die eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau anstrebt, das gefährliche anthropogene Störungen des Klimasystems ausschließt (vgl. Klimaänderung 2001, S. 127; Rahmstorf, Schellnhuber 2007, S. 98 ff.).

Entsprechend seinem hohen Rang wurde dem Klima als einem globalen Problem in der wissenschaftlichen Tätigkeit der Leibniz-Sozietät, auch im Gefolge bedeutsamer Forschungsaktivitäten von Mitgliedern der DDR-Akademie (W. Böhme, S. Dyck, E. A. Lauter, K. Voigt) von Anfang an breiter Raum gewidmet. Das widerspiegelt sich in den Publikationen der Sozietät mit entsprechenden Beiträgen im Rahmen der Diskussion des globalen Wandels (Bernhardt, Böhme 1994, Lanius 1994) oder der Erörterung der sicheren Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen (Böhme 2005, Jäger 2005, Lanius 2005) und umfaßt den holozänen Klimawandel in Mitteleuropa (Jäger 2007) ebenso wie einen Einblick in das Klimageschehen der Goethezeit (Bernhardt 2000a), eine Darstellung der Klimatheorie der gesellschaftlichen Entwicklung in der Zeit der Aufklärung (Müller 2005) oder den Vortrag von H. J. Schellnhuber über Erdsystemanalyse und Koevolution auf der Festsitzung zum Leibniz-Tag des Jahres 2004 (vgl. Leibniz Intern, Nr. 24 vom 8. September 2004) und aus jüngster Zeit die Mitwirkung der Leibniz-Sozietät an der Pfingstwerkstatt Neue Musik zum Thema „Klima – Balance – Klimabalance“ in Rheinsberg (vgl. Leibniz Intern, Nr. 40 vom 26. Juli 2008 sowie Hörz 2008c). Besonders verwiesen sei schließlich auf die Beiträge von Herrmann 2009 und Lanius 2009 im vorliegenden Band der Sitzungsberichte.

In Fortführung dieses interdisziplinären Diskurses sollen im folgenden Aspekte einer Dialektik des Klimas umrissen werden (vgl. auch Bernhardt 2008). „Dialektik“ wird dabei im Sinne von Hörz 2006, 2008a als Theorie des Gesamtzusammenhangs verstanden, genauer als Theorie der Struktur, Entwicklung und Veränderung in Natur und Gesellschaft, von Begriffen und Theorien sowie der Aneignung der Wirklichkeit in ihren verschiedenen Formen.

„Dialektik des Klimas“ meint, analog zu Friedrich Engels‘ „Dialektik der Natur“ (MEW 20, 305- 570, MEGA 26) sowohl die Dialektik des Erkenntnisprozesses in bezug auf das Klima als der statistischen Gesamtheit atmosphärischer Zustände und Prozesse in ihrer raumzeitlichen Verteilung („subjekti-

ve“ Dialektik der Wissenschaft vom Klima) als auch die („objektive“) Dialektik des Klimasystems und seiner Wechselwirkung mit „allen gleichzeitigen Gesellschaften“ im Sinne von Marx (MEW 25, 784).

Die Engelsschen Beiträge, Notizen und Fragmente zur Dialektik der Natur, deren Abfassung und Zusammenstellung vor ca.125 Jahren abgeschlossen wurde, können dabei – einschließlich der Bemerkungen unter dem Stichwort „Klima“ – durchaus als Ausgangspunkt und heuristische Anregung dienen.

Dialektik des Erkenntnisprozesses

Der Erkenntnisprozeß in bezug auf das Klima widerspiegelt sich zunächst in der Entwicklung des Klimabegriffes bzw. im Wandel der Klimadefinitionen, wie ihn beispielsweise Schneider-Carius 1961 von der Zeit Humboldts bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts kritisch dargestellt hat. Die Humboldtsche Bestimmung des Klimas im „Kosmos“ durch „alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsre Organe merklich afficiren“ (Humboldt 1845, S. 340; vgl. auch Bernhardt 2003, S. 207-209), war ganzheitlich in bezug auf den Menschen ausgerichtet, dessen Abhängigkeit von atmosphärischen Erscheinungen schon antiken Denkern (Hippokrates) bekannt war. Zugleich aber war sie zu eng in bezug auf die Atmosphäre selbst bzw. auf das später zu behandelnde Klimasystem, aus deren universellem Zusammenhang keine Zustands- oder Prozeßparameter nach Maßgabe ihrer Wirksamkeit auf den menschlichen Organismus ausgegliedert werden können.

Andererseits verweist die Humboldtsche Definition auf die „Veränderungen“ – auch als „Veränderliche“ zu interpretieren – und vermeidet die in späteren Jahrzehnten übliche Einengung des Klimabegriffs auf den mittleren Zustand der Atmosphäre bzw. den durchschnittlichen Verlauf der Witterung („Mittelwertsklimatologie“). Die moderne Definition des Klimas beispielsweise als „Synthesis of weather conditons in a given area, characterized by long-term statistics (mean values, variances, probabilities of extreme values, etc.) of the meteorological elements in that area“ (WMO 1992, S. 112) fußt auf der Beschreibung des Verhaltens von Kombinationen atmosphärischer Parameter mittels moderner Verfahren der mehrdimensionalen Statistik und erfaßt damit auf höherer Ebene wiederum eine Ganzheit, den „Totaleindruck“ atmosphärischer Wirkungskomplexe im Humboldtschen Sinne einschließlich ihres Einflusses auf die Biosphäre – Negation der Negation in der Entwicklung des Klimabegriffes.

Der Wandel der Klimatologie von einer „geographischen Meteorologie“ in Gestalt einer messenden, beschreibenden und vergleichenden Naturwissenschaft im Zeitalter Humboldts zu einer rechnenden und modellierenden Wissenschaft vom Klima in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts vollzog sich im Kontext mit der Entwicklung der Meteorologie zu einer exakten Naturwissenschaft auf der Grundlage der klassischen und von Teilgebieten der modernen Physik (Mechanik, Thermo- und Hydrodynamik bzw. Quantentheorie). Die verstärkte Einbeziehung weiterer Grundlagenwissenschaften, besonders der Chemie (atmosphärische Chemie), kennzeichnete den Übergang von einer Auffassung der Meteorologie als bloße Physik der Atmosphäre zum Begriff der atmosphärischen Wissenschaften („atmospheric sciences“). Parallel dazu gewann auch in der Wissenschaft vom Klima die lange Zeit vernachlässigte, obschon bereits in der ausführlichen Fassung der Humboldtschen Klimadefinition ausdrücklich apostrophierte Chemie zunehmend an Bedeutung („chemische Klimatologie“, vgl. etwa Möller 2006).

Die soeben skizzierte Entwicklung der Meteorologie wurde zunächst vor allem von dem Verlangen nach einer zuverlässigen Wettervorhersage vorangetrieben, deren Fehlen nicht nur eine „wunde Stelle im Gewissen des Physikers“ (Helmholtz, vgl. Bernhardt 1973) berührte, sondern die mehr noch dringenden Bedürfnissen von Schiffahrt, Landwirtschaft, Handel, Gewerbe und Gesundheitswesen entsprach (vgl. z. B. Körber 1987, S. 165 ff., Balzer 2007). Der Weg der Wettervorhersage (z. B. Bernhardt 1998) über verschiedene, wesentlich empirisch und physikalisch unterschiedlich gut begründete Schulen synoptischer Meteorologie bis hin zur Vorausberechnung künftiger atmosphärischer Zustände mittels näherungsweiser Integration der bestimmenden thermohydrodynamischen Gleichungen – der schon in der Einleitung erwähnten numerischen Wettervorhersage – war zugleich für die Entwicklung der Klimatologie bedeutsam, zunächst im Sinne einer vornehmlich physikalischen Begründung des in der beschreibenden und vergleichenden Klimatologie zusammengetragenen Beobachtungs- und Datenmaterials (physikalische Klimatologie).

Hatte H. W. Dove (1803–1879) Wettergeschehen und Klimaregime der mittleren Breiten auf den „Kampf“ zweier Luftströmungen („Polar- und Äquatorialstrom“) zurückgeführt, worin Fritscher 2005 direkte Beziehungen zur Hegelschen Naturphilosophie sieht, so rückte in den folgenden Jahrzehnten das als primär verstandene Luftdruckfeld mit seinen engen Beziehungen zum atmosphärischen Strömungsfeld (barisches Windgesetz) als wetter- und klimabestimmender Faktor in den Vordergrund („Isobarenmeteorologie“),

bevor mit der Polarfronttheorie von V. Bjerknes (1862–1951) wiederum, nunmehr auf der Grundlage der inzwischen ausgestalteten Dynamik der Atmosphäre (dynamische bzw. theoretische Meteorologie), Luftmassen und atmosphärische Fronten als entscheidende atmosphärische Strukturen angesehen wurden. Diesem durchaus als Negation der Negation zu interpretierenden Prozeß entsprach etwa die „luftmassenmäßige Arbeitsweise" in synoptischer Meteorologie und Wettervorhersage in den Jahren vor und um den zweiten Weltkrieg sowie auf klimatologischem Feld die „dynamische" bzw. Witterungsklimatologie – letztere, wie im Zusammenhang mit der Klimadefinition weiter oben ausgeführt, auch als Negation der Negation des Humboldtschen Klimabegriffs zu verstehen. (Eine Darstellung des Luftmassen-, Fronten- und Zyklonenkonzeptes aus heutiger Sicht findet man bei Klose 2008, Kapitel 9, 10.)

Übrigens startete auch die numerische Wetterprognose wiederum als eine auf das großräumige atmosphärische Druck- und Stromfeld ohne Frontenstrukturen ausgerichtete Methode der Wettervorhersage, gewissermaßen als eine „Isobarenmeteorologie" auf der höheren Ebene einer (näherungsweisen) Lösung thermohydrodynamischer Gleichungen für gegebene Anfangs- und Randbedingungen. Die numerische Wettervorhersage machte zugleich die schon von Helmholtz und Poincaré vermutete prinzipielle Grenze der Vorhersagbarkeit sichtbar, die im chaotischen Charakter der atmosphärischen Bewegungen als eines nichtlinearen deterministischen Systems begründet liegt: Unmeßbar bzw. unbeobachtbar geringfügige Variationen der Anfangsbedingungen führen nach einigen Tagen Realzeit zu wesentlichen Abweichungen in den Folgezuständen der Atmosphäre, die somit nicht mehr hinreichend genau durch den zwangsläufig nur mit Meß- und Beobachtungsungenauigkeiten erfaßbaren Anfangszustand bestimmbar sind (vgl. Bernhardt 1998 mit weiteren Literaturhinweisen).

Der praktische Ausweg aus diesem Dilemma besteht derzeit in der schon zur operativen Routine gewordenen und bereits für manche Fernsehwetterberichte genutzten Verwendung einer ganzen Schar numerisch erzeugter Vorhersagen (Ensemblemethode), deren Divergenz im Verlaufe des Vorhersagezeitraums zugleich eine Aussage über die Unsicherheit der Prognose gestattet. Das betrachtete Ensemble kann dabei entweder aus Integrationen mit Hilfe ein und desselben Modells für leicht variierte Anfangsbedingungen (single model ensemble) oder aber aus Integrationen für gleiche Anfangsbedingungen, aber unter Verwendung unterschiedlicher Modelle bzw. eines Modells mit variierten Parametern (multi model ensemble), bestehen.

Es ist der im dialektischen Determinismus näher untersuchten (objektiven) Dialektik von Zufall und Notwendigkeit geschuldet, daß ungeachtet der Grenze der praktischen Vorhersagbarkeit des Wetters, die – je nach Ausgangssituation, Modellfamilie, geographischer Region und erhobenem Genauigkeitsanspruch – bei etwa 5 bis 10 Tagen anzusetzen sein dürfte, numerische Modelle der atmosphärischen Zirkulation (globale Zirkulationsmodelle, GCMs) zur Zeit als wichtigstes Werkzeug der Klimamodellierung und damit auch als Hilfsmittel zur Ableitung von Aussagen über das künftige Klima dienen.

Dabei werden durch Langzeitintegrationen mittels numerischer Modelle über Jahrzehnte, Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende atmosphärische Zustände simuliert, die natürlich keinesfalls als deterministische „Wetter"vorhersagen aufgefaßt werden dürfen, deren statistische Charakteristika (z. B. zeitliche und räumliche Mittelwerte, Streuungen, Eintritt von Extremwerten meteorologischer Parameter wie auch Häufigkeit bestimmter Wetterlagen und atmosphärischer Strukturen, etwa tropischer Wirbelstürme u. a.) aber das Klima im Sinne der eingangs gegebenen Definition als statistische Gesamtheit atmosphärischer Zustände und Prozesse in ihrer raumzeitlichen Verteilung wiedergeben sollen. Es handelt sich also um statistisch auswertbare numerische Langzeitexperimente mit der Atmosphäre bzw. mit dem gekoppelten System Ozean und Atmosphäre, zunehmend unter Einbeziehung weiterer Komponenten des Klimasystems (Biosphäre, Technosphäre etc.).

Im Rahmen der Dialektik des Erkenntnisprozesses zum Klima bleibt darauf hinzuweisen, daß diese hochkomplizierten dreidimensionalen numerischen Modelle an die Stelle ungleich weniger rechenaufwendiger null-, ein- und zweidimensionaler Modelle getreten sind, die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt wurden und die unter Verwendung physikalischer Erhaltungssätze und halbempirischer Ansätze („Parametrisierung") unmittelbar klimatische Parameter, z. B. die globale Mitteltemperatur an der Erdoberfläche (0-d(imensional)), in Abhängigkeit von der Höhe oder der geographischen Breite (1-d), aber auch als Funktion von geographischer Breite und Länge (2-d), lieferten. (Eine Übersicht über die Hierarchie von Klimamodellen gegen Ende des 20. Jahrhunderts ist bei Schmitz 1991 zu finden.)

Nach der Ablösung dieser Modelle durch die ganz anders gearteten allgemeinen Zirkulationsmodelle könnte man als Negation der Negation an eine Klasse von künftigen Modellen denken, die wie die numerischen Zirkulationsmodelle vom System der vollständigen thermohydrodynamischen Grund-

gleichungen samt adäquaten Anfangs- und Randbedingungen ausgehen, aber über stochastische Lösungen direkt (anstatt über numerische Langzeitexperimente) das „Klima“ in Gestalt von Verteilungsfunktionen der interessierenden Parameter erzeugen. Auf dem Gebiet der Wettervorhersage wurde ein derartiges Konzept einer stochastisch-dynamischen Prognose, bei der die zeitliche Entwicklung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen atmosphärischer Felder modelliert wird, schon vor Jahrzehnten diskutiert (z. B. Epstein 1969, Tatarskij 1969), ist aber unseres Wissens noch nicht anwendungsreif realisiert, sondern wird operationell durch die oben umrissene Ensemblemethode ersetzt.

Über dem historischen Abriß der Klimamodellierung als einem Element der Dialektik des Erkenntnisprozesses darf die stürmische Entwicklung der empirischen Seite von Meteorologie und Klimatologie keinesfalls außer acht gelassen werden, die nicht nur deduktive Naturwissenschaften darstellen. Gemeint sind die quantitative wie qualitative Entwicklung bodengebundener und satellitengestützter Meßverfahren zur Erweiterung und Vervollkommnung der Datenbasis für die Diagnostik des gegenwärtigen Klimaregimes ebenso wie neuartige Verfahren zur Erfassung des Klimas und seiner Schwankungen in historischer Zeit und in der geologischen Vergangenheit (z. B. Hupfer et al. 1991, Kapitel 7 und 8); die empirischen Befunde erfordern eine Deutung durch die Klimamodelle, für deren Verifizierung wiederum Daten über das Klima in Gegenwart und Vergangenheit unerläßlich sind.

Auf weitere Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden. Das gilt auch für den gesamten Komplex der institutionengeschichtlichen Entwicklung der Klimatologie, die beispielsweise zu Zeiten Doves als Leiter des 1847 gegründeten Preußischen Meteorologischen Instituts im Nebenamt zunächst in Einmannarbeit (!) betrieben wurde (Körber 1997), heute aber zu einer an großen nationalen und internationalen Instituten gepflegten und in weltweiten Forschungsprogrammen koordinierten interdisziplinären „big science“ geworden ist.

Anfänge der komplexen Atmosphärenforschung am Ende des 19. Jahrhunderts haben wir am Beispiel der national und alsbald in internationaler Kooperation betriebenen wissenschaftlichen Luftfahrten an anderer Stelle beschrieben (Bernhardt 2000b, 2004). In bezug auf die weitere Internationalisierung der Erforschung des Planeten Erde einschließlich seines Klimas sei hier nur auf den Zeitraum des letzten halben Jahrhunderts verwiesen, an dessen Anfang das Jahr 1957 mit der Eröffnung des Raumfahrtzeitalters und zugleich dem Beginn des Internationalen Geophysikalischen Jahres, des IGY (z.

B. Nicolet 1982), eine neue Etappe der Geo-, speziell der geophysikalischen Wissenschaften einleitete.

Mit der Erderkundung aus dem erdnahen kosmischen Raum wurden eine vorher undenkbare laufende Überwachung des Planeten Erde einschließlich seiner Atmo-, Hydro-, Kryo-, Litho- und Biosphäre als Komponenten des Klimasystems möglich, speziell für die Meteorologie eine ständige flächendeckende Bereitstellung von real-time-Anfangsdaten für die unterschiedlichsten Simulationen wetter- und klimabildender atmosphärischer Prozesse. Das IGY, an dem ca. 30 000 Wissenschaftler aus 67 Ländern teilnahmen, stellte mitten in der Zeit des Kalten Krieges ein bis dahin beispielloses wissenschaftliches Gemeinschaftsunternehmen dar, das 1973 in einem Bericht an das US-Repräsentantenhaus als „perhaps the most ambitious and at the same time the most successful cooperative enterprise even undertaken by man“ bezeichnet wurde (zitiert nach Wood, Overland 2006, S.1695) und das inzwischen, ebenso wie die Entwicklung der Klimasimulation, bereits zum Gegenstand interdisziplinärer Diskurse auf wissenschaftshistorischen Kongressen geworden ist (z. B. Ede 2005, Dahan-Dalmedico 2005).

Das IGY und die ihm folgende Internationale Geophysikalische Kooperation (1959) bereiteten auch den Weg für das Globale Atmosphärische Forschungsprogramm (GARP), das, durch UNO-Resolutionen aus den Jahren 1961/62 initiiert, sich mit weltweiten Beobachtungs- und Rechenexperimenten die Verbesserung der Wettervorhersage und ein vertieftes Verständnis der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre zum Ziel setzte, wie es auch für die Klimaforschung und die Klimasimulation unumgänglich ist. Insofern war das GARP (1967–82) eine Vorstufe zum Weltklimaprogramm (WCP) mit seinen zahlreichen Unterprogrammen, das im Anschluß an die erste Weltklimakonferenz der Meteorologischen Weltorganisation (WMO) im Jahre 1979 im Zusammenwirken mit dem Internationalen Rat der Wissenschaftlichen Unionen (ICSU) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) mit dem Ziel in Gang gesetzt wurde, Mittel zur Vorhersage künftiger Klimaänderungen zu entwickeln und die Staaten bei der Nutzung von Klimadaten zu unterstützen (für Details vgl. Hupfer et al. 1991, Abschnitt 1.2).

Im Jahre 1988 schließlich wurde gemeinsam von WMO und UNEP ein Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gegründet, das in sechsjährigen Abständen (zuletzt IPCC 1995, 2001, 2007, sämtlich einsehbar über http://www.ipc.ch) umfangreiche Sachstandsberichte erarbeitet, die zunächst in Kurzfassungen für Politikverantwortliche und in der Regel eine Jahr später

in vollem Umfang veröffentlicht werden, wozu noch ein Synthesebericht gehört, der auch in deutscher Übersetzung vorliegt (z. B. Klimaänderung 2001).

Das hohe öffentliche Interesse und die erheblichen Aufwendungen für die Klima- als Teil der Erdsystemforschung widerspiegeln zum einen die erheblich angewachsene Vulnerabilität der heutigen Gesellschaften gegenüber Witterungserscheinungen – besonders extremen Ereignissen – und weiterem Klimawandel. Entgegen früheren naiven Vorstellungen von einer unbegrenzten Beherrschbarkeit der Natur und zunehmender Unabhängigkeit der Gesellschaft vom Wettergeschehen haben beispielsweise neue und schnellere Verkehrsmittel, Hochbauten, Monokulturen und veränderte Anbaumethoden in der Landwirtschaft, vor allem aber Verstädterung, Bevölkerungswachstum und -konzentration, darunter in Flußtälern und küstennahen Regionen, sowie nicht zuletzt zunehmende soziale Spaltung und Differenzierung neue Formen der Abhängigkeit von der atmosphärischen Umwelt hervorgebracht. Zum anderen führt die Intensivierung des Stoffwechsels zwischen Mensch und Natur zu verstärkten unbeabsichtigten Einwirkungen auf die Atmosphäre bzw. das gesamte Klimasystem, wofür etwa die Anreicherung bodennahen und der Abbau stratosphärischen Ozons („Ozonloch“) oder die weltweite Erwärmung („global warming“) als Folge zunehmender Konzentration strahlungsaktiver Spurengase in der Atmosphäre beredte Beispiele sind.

Die Rückschau auf den Erkenntnisprozeß zum Klimaproblem mit seinen ideen- und institutionengeschichtlichen Aspekten kann nicht zuletzt auch für die Einschätzung der heutzutage um Ursachen, Auswirkungen und Konsequenzen des gegenwärtigen Klimawandels mitunter recht emotional und manchmal leider auch unsachlich geführten Diskussion von Nutzen sein. So zeigt etwa die Historie, daß die Vorstellung einer durch Eingriffe in den Strahlungshaushalt der Atmosphäre anthropogen verursachten Komponente der derzeitigen globalen Erwärmung keine ad hoc ersonnene Erfindung gleichgeschalteter Spezialisten, sondern Ergebnis eines widerspruchsvoll verlaufenen Erkenntnisprozesses ist, der im 19. Jahrhunderts seinen Anfang nahm, so mit Arbeiten von Fourier und Pouillet in der ersten, von Tyndall und Arrhenius in der zweiten Jahrhunderthälfte (vgl. die Bibliographie von Handel und Risbey 1992, die Arbeit von Fleming 2005 und neuerdings die Zusammenstellung von Originalarbeiten durch Fleming 2008)).

Im Hinblick auf überwundene Irrtümer und gegenwärtige Unsicherheiten und Ungewißheiten sei an Engels‘ erkenntnisoptimistisches Credo in der „Dialektik der Natur“ erinnert: „Was unser Denken ergründen kann, sehen

wir vielmehr aus dem, was es bereits ergründet hat und noch täglich ergründet“ (MEW 20, 507; MEGA 26, 228).

Gegenwärtigen Wissensstand als eine Etappe in einem nicht endenden Erkenntnisprozeß und in diesem Sinne als „relative Wahrheit“ zu begreifen, bewahrt andererseits vor Überbewertung des Erreichten und läßt den Meinungsstreit als unabdingbare Voraussetzung künftigen Erkenntnisfortschritts erscheinen. Wie hatte doch A. v. Humboldt bei der Eröffnung der 7. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in Berlin fast auf den Tag genau vor 180 Jahren erklärt? „Entschleierung der Wahrheit ist ohne Divergenz der Meinungen nicht denkbar, weil die Wahrheit nicht in ihrem ganzen Umfang, auf einmal, und von allen zugleich erkannt wird. Jeder Schritt, der den Naturforscher seinem Ziele zu nähern scheint, führt ihn an den Eingang neuer Labyrinthe. Die Masse der Zweifel wird nicht gemindert, sie verbreitet sich nur, wie ein beweglicher Nebelduft, über andre und andre Gebiete. Wer golden die Zeit nennt, wo Verschiedenheit der Ansichten, oder wie man sich wohl auszudrücken pflegt, der Zwist der Gelehrten, geschlichtet sein wird, hat von den Bedürfnissen der Wissenschaft, von ihrem rastlosen Fortschreiten, eben so wenig einen klaren Begriff, als derjenige, welcher, in träger Selbstzufriedenheit sich rühmt, in der Geognosie, Chemie oder Physiologie, seit mehreren Jahrzehnten dieselben Meinungen zu verteidigen“ (Humboldt 1828).

Dialektik des Klimasystems

Schon A. v. Humboldt hatte erkannt, daß das Klima zwar zunächst „eine specifische Beschaffenheit des Luftkreises“ bezeichnet, diese aber abhängig ist „von dem perpetuirlichen Zusammenwirken einer all- und tiefbewegten, durch Strömungen von ganz entgegengesetzter Temperatur durchfurchten Meeresfläche mit der wärmestrahlenden trocknen Erde, die mannigfaltig gegliedert, erhöht, gefärbt, nackt oder mit Wald und Kräutern bedeckt ist“ (Humboldt 1845, S. 304; vgl. auch Bernhardt 2003, S. 210 ff.). Damit waren bereits auf der Grundlage einer ganzheitlich-synthetisierenden Betrachtungsweise beschreibender und vergleichender Naturforschung, einer „denkenden Betrachtung der Empirie“, die Hauptkomponenten des Klimasystems benannt, das in moderner Terminologie Atmo-, Hydro-, Kryo-, Bio- sowie Litho- bzw. Pedosphäre umfaßt und das, namentlich nach Ergänzung durch den als Techno-, Noosphäre o. ä. bezeichneten Bereich menschlicher Tätigkeit in neuerer Zeit auch als „Erdsystem“ bezeichnet wird.

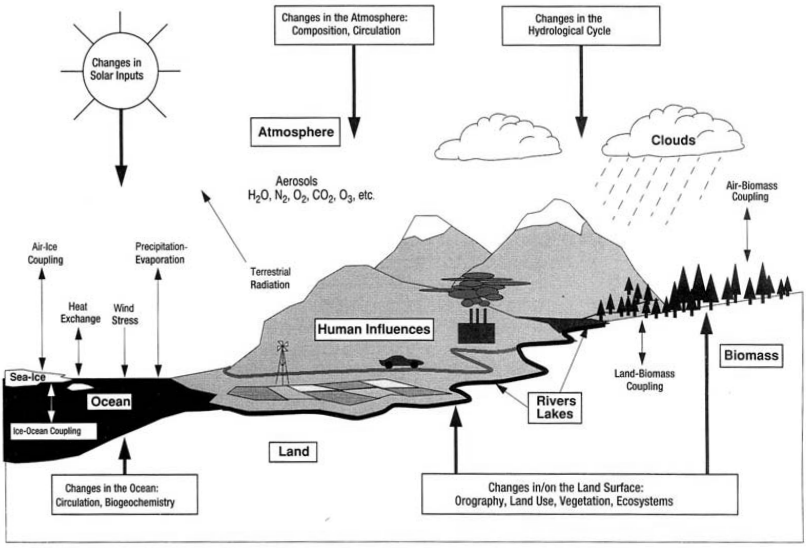

Abb.1: Komponenten des Klimasystems mit Wechselwirkungsprozessen (dünne Pfeile) und ausgewählten Mechanismen für Klimaänderungen (dicke Pfeile) nach Trenberth et al. 1996.

Eine schematische Darstellung des Klimasystems (IPCC 1996, S. 55) ist in Abb. 1 wiedergegeben (vgl. auch ähnliche Schemata bei Hantel 1989a, b, Hupfer et al. 1991, S. 42, Bernhardt, Böhme 1994, S. 55, IPCC 2001, S. 88 u. a.). Es handelt sich um ein hochkomplexes, nichtlineares dynamisches System mit zahlreichen Rückkoppelungsmechanismen, die eine hohe Empfindlichkeit gegenüber externen Anregungen – etwa variablen Vulkanstaubtrübungen der Atmosphäre oder Veränderungen des solaren Strahlungsflusses und seiner raumzeitlichen Verteilung an der Atmosphärenobergrenze – bedingen, aber auch vielfältige interne Schwankungen, z. B. im Luftdruck- und Stromfeld höherer Breiten (nordatlantische Oszillation, NOA) oder im atmosphärisch-ozeanischen Zirkulationsregime des tropischen Pazifik (El-Niño/ Southern Oscillation, SO), hervorbringen.

So wird die Existenz von permanenten Klimaschwankungen in allen Raum- und Zeitbereichen verständlich – im globalen Maßstab von der Aufeinanderfolge weiträumiger Vereisungen im Abstand mehrerer 10^8 Jahre bis herab zu den oben erwähnten mehrjährigen Zirkulationsschwankungen regionalen Charakters. Den Klimawandel kann man ebensowenig „bekämpfen“

wie die Erddrehung – der „Wandel“ ist die Daseinsweise des Klimas! Selbst die Charakterisierung des gegenwärtigen globalen Klimas hängt daher von dem gewählten zeitlichen Referenzintervall ab: Vor einem zeitlichen Hintergrund von vielen Millionen Jahren (Megajahren) leben wir in einem Eiszeitalter (Pleistozän), das durch vereiste Polargebiete und ausgedehnte Hochgebirgsvergletscherungen und in seinem zeitlichen Verlauf durch einen mehrfachen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten (Glaziale und Interglaziale von größenordnungsmäßig jeweils etwa 10^5 bzw. 10^4 Jahren Dauer) gekennzeichnet ist. Der Höhepunkt der gegenwärtigen, bereits ca. 11 000 Jahre andauernden Warmzeit (Holozän), das Atlantikum, liegt etwa 6 000–8 000 Jahre zurück, aber innerhalb der derzeitigen kühleren Endphase des Holozäns sind wir seit mehr als einem Jahrhundert mit einer markanten globalen Erwärmung konfrontiert (für weitere Details zur Klimageschichte in dem genannten Zeitraum vgl. z. B. Hupfer et al. 1991, Kapitel 8, Rahmstorf, Schellnhuber 2007, Abschnitt 1 und speziell für Mitteleuropa Jäger 2007).

Auffällig an den aus Eisbohrkernen, Tiefseesedimenten und anderen „Proxy“-Datenquellen erschlossenen Temperaturkurven für das pleistozäne Eiszeitalter, wie sie in einigen Beispielen aus der Literatur bei Lanius 2009, Abb. 1–3, 5 wiedergegeben sind, ist deren sägezahnähnlicher Verlauf mit steilem Anstieg zu den Warm- und flachem Abfall in den Kaltzeiten, noch auffälliger aber das Auftreten ganz analoger, „selbstähnlich“ strukturierter kalter und warmer Perioden innerhalb der Kalt- und Warmzeiten mit raschem Temperaturanstieg um bis zu 10 K binnen weniger Jahrhunderte oder sogar nur Jahrzehnte! Für Kenner der materialistischen Dialektik sind „critical thresholds within the Earth‘s climate system“ (Rial et al. 2004) nicht überraschend und als Folge von Nichtlinearitäten und Rückkoppelungsmechanismen im Klimasystem erklärbar, ebenso wie das Auftreten von „tipping points“ bzw. zugeordneter „tipping elements“ als Komponenten des Erdsystems auch regionalen Maßstabes, die einen „Kipp-Punkt“ herbeiführen können, an dem das Klimasystem „abrupt“ in einen neuen Zustand übergeht (für Details vgl. Lenton et al. 2008 oder auch das Hintergrundpapier des Umweltbundesamtes, UBA 2008).

„Abrupte“ Klimaänderungen sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand für das Klima des seit ca. 2,5 Millionen Jahren andauernden Eiszeitalters geradezu konstitutiv. Mehr noch, ihr Ausbleiben seit dem letzten Kälterückfall (jüngere Dryas) am Beginn der heutigen holozänen Warmzeit vor etwa 11 500 Jahren und einem schwächerem Kälterückfall vor etwa 8 200 Jahren („8k-Event“) zählt zu den Merkwürdigkeiten der in geologischen Maßstäben jün-

geren Klimaentwicklung. Die Geschichte der Menschheit hat sich also seit dem Ende der Altsteinzeit (des Paläolithikums) unter in globalem Maßstab relativ gleichförmigen klimatischen Bedingungen vollzogen – ungeachtet mancher einschneidender regionaler Klimaschwankungen mit spektakulären Auswirkungen, wie der Austrocknung der Sahara im Laufe der gegenwärtigen Warmzeit oder dem mittelalterlichen Klimaoptimum im atlantisch-europäischen Raum, das z. B. Fahrten der Wikinger zur Küste Nordamerikas und die Besiedelung Islands und Grönlands im 9. bis 12. Jahrhundert ermöglichte und das von der bis ins 19. Jahrhundert währenden „kleinen Eiszeit" abgelöst wurde (die Niederlassungen auf Grönland fielen bereits im 14. Jahrhundert dem Klimawandel zum Opfer, vgl. z. B. Ogilvie et al. 2000). Für Mitteleuropa allerdings hat Jäger 2007 die Abweichungen der Jahresmitteltemperaturen von denen eines Referenzzeitraums 1961–90 auf Grund von Proxydaten für die letzten mehr als 10 000 Jahre auf eine Amplitude von nicht mehr als 1–3 K veranschlagt.

Daß alle bisherigen großräumigen abrupten Klimaänderungen ohne menschliches Zutun erfolgt sind, schließt keineswegs die Möglichkeit aus, daß die derzeitige globale Erwärmung – zunächst unabhängig von ihrem anthropogenen Anteil! – in die erste abrupte Klimaänderung der neueren Menschheitsgeschichte überleitet. Anthropogene Einwirkungen auf das Klimasystem erfolgen in ihrer Mehrzahl über die gleichen physikalischen (bzw. physikalisch-chemischen, evtl. auch biochemischen u. ä.) Mechanismen wie die natürlichen Einwirkungen. Insofern hat sich der Wandel des Klimas in der jüngeren Vergangenheit sicher unter dem gemeinsamen Einfluß natürlicher und anthropogener Faktoren vollzogen, wobei die Rolle der letzteren in Zukunft weiter an Gewicht gewinnen wird, ohne daß aber – was in der aufgeheizten Klimadiskussion nicht selten außer acht gelassen wird – die natürlichen Faktoren ihren Einfluß verlieren werden!

Natürliche Antriebsmechanismen („forcing") im Zeitbereich von Jahrzehnten bis zu einigen Jahrhunderten sind in erster Linie wechselnde Vulkanstaubtrübungen der Atmosphäre und Schwankungen des solaren Strahlungsflusses, darunter im Sonnenfleckenzyklus. Mit den Variationen der Sonnenaktivität gekoppelte Schwankungen der Emission im kurzwelligen (ultravioletten) Spektralbereich sind nachweislich vor allem in der mittleren Atmosphäre wirksam und können über die besonders im Winterhalbjahr enge Koppelung zwischen Strato- und Troposphäre das Zirkulations- und Klimaregime der gesamten Atmosphäre beeinflussen. Klimaeffekte der globalen Partikelstrahlung (Sonnenwind) oder einer Modulation der die Erde errei-

chenden galaktischen kosmischen Strahlung durch das variable solare Magnetfeld via Einwirkung von Partikeln auf Nukleationsprozesse in der Wolkenmikrophysik werden derzeit intensiv diskutiert (vgl. z. B. Hellmuth 2008).

Die im Zeitmaßstab von 10^4 bis 10^5 Jahren angesiedelten Milankovich-Zyklen der Erdbahnelemente, die die Verteilung der an der Atmosphärenobergrenze einfallenden Sonnenstrahlung nach Jahreszeit und geographischer Breite verändern, werden als Trigger für den weltweiten Wechsel von Warm- und Kaltzeiten im Eiszeitalter, über ihren Einfluß auf die jahreszeitlich wechselnde Monsunzirkulationen auch für regionale Klimaänderungen, wie das oben erwähnte wechselnde Niederschlagsregime der Sahara in historischer Zeit, verantwortlich gemacht, dürften aber für die Klimaschwankungen des letzten Jahrtausends ohne Bedeutung sein.

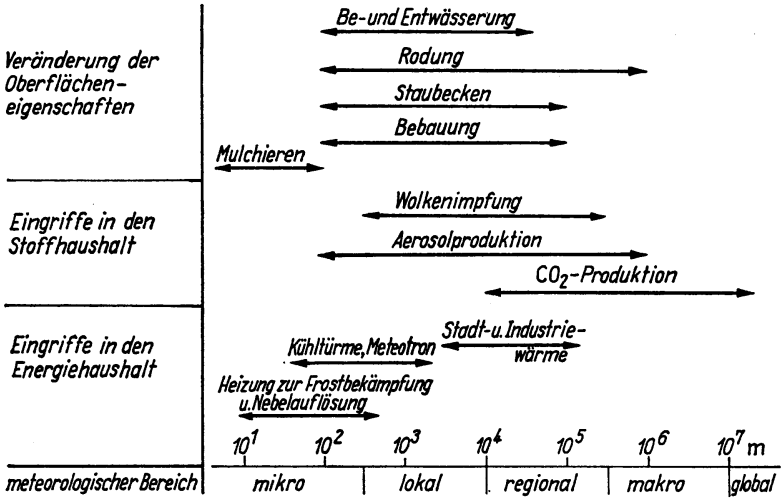

Abb. 2: Charakteristische Maßstäbe ausgewählter anthropogener Einwirkungen auf das Klimasystem, leicht verändert nach Bernhardt, Kortüm 1976.

Anthropogene Einflüsse auf das Klimasystem sind grundsätzlich über Veränderungen der Erdoberfläche (Landnutzung), Eingriffe in den (Spuren)Stoffhaushalt der Atmosphäre oder (z. B. als Abwärme) in ihre Energiebilanz möglich (Bernhardt, Kortüm 1976, vgl. auch Hupfer et al., 1991, Kapitel 6). Sie reichen laut dem Schema in Abb. 2 von der Modifikation des Mikroklimas in Pflanzenbeständen durch Heizen, Frosträuchern oder Mulchieren über

das Stadtklima als Modellfall für ein durch komplexe anthropogene Einwirkungen modifiziertes Lokalklima, die Beeinflussung des regionalen Klimas durch ausgedehnte Rodungen oder wasserbauliche Maßnahmen bis hin zur großräumigen oder globalen Klimabeeinflussung durch Eingriffe in den Aerosolhaushalt oder die Bilanz strahlungsaktiver „Treibhaus"gase.

Gezielte und/oder unbeabsichtigte anthropogene Klimabeeinflussung ist insofern eine immanente Komponente der Wechselwirkung von Natur und Gesellschaft, und eine These wie „Die Natur, nicht menschliche Aktivität, bestimmt das Klima" als Buchtitel (Singer 2008) ist in dieser Absolutheit auch für die Vergangenheit und nicht nur für das Anthropozän unzutreffend, in dem der Mensch zu einem geologischen Faktor (Vernadskij 1944) und damit zwangsläufig auch zu einem nicht mehr vernachlässigbaren Einflußfaktor im globalen Klimageschehen geworden ist. Als Beginn des „Anthropozäns" – der Epoche merklichen menschlichen Einflusses auf das globale Klima – werden für gewöhnlich die Jahre 1750 oder 1800 (Ende der vorindustriellen Ära) angesetzt (z. B. Crutzen, Stoermer 2000); eine wesentlich frühere Datierung (Ruddiman 2003) ist heftig umstritten.

Auf der anderen Seite wird die Auseinandersetzung mit der Gilde der „Klimaskeptiker" (z. B. Lindzen 2007, Singer 2008) erschwert, wenn außer acht gelassen bzw. nicht von vornherein betont wird, daß die gegenwärtige wie die künftige Klimaentwicklung sowohl von natürlichen als auch von anthropogenen Einflüssen bestimmt wird, deren Effekte aber wegen des hochgradig nichtlinearen Charakters des Klimasystems nicht einfach addiert werden können! (Der häufig verwendete, aber wenig sinnvolle Begriff „Klimaskeptiker" dient hier zur Kennzeichnung von Auffassungen, wonach der gegenwärtig zu beobachtende Klimawandel ausschließlich naturbedingt bzw. in so geringem Maße von menschlichen Aktivitäten mitbeeinflußt ist, daß einschneidende Maßnahmen, z. B. zur Emissionsminderung, nicht notwendig bzw. nicht vertretbar sind, zumal die weitere Klimaentwicklung nur höchst ungenau vorhersagbar sei und Klimaänderungen neben „Verlierern" auch „Gewinner" verzeichneten, nach manchen Autoren eine weltweite Erwärmung sogar überwiegend positiv zu bewerten sei.)

Auf Grund der Nichtlinearitäten im Klimasystem ist auch die gelegentlich geforderte Trennung naturbedingter und menschgemachter Klimaänderungen nicht ohne weiteres realisierbar. Überhaupt erscheint es wenig glücklich, wenn in der einleitend erwähnten UN-Klima-Rahmenkonvention „climate change ... is attributed directly or indirectly to human activity ... which is in addition to natural climate variability ...", „Klimaänderung" also ausdrück-

lich auf Auswirkungen menschlicher Aktivitäten beschränkt und von einer zusätzlichen natürlichen „Klimavariabilität“ unterschieden wird. Im Verständnis des IPCC ist demgegenüber die Rede von „climate change ... due to natural internal processes or external forcings, or to persistent anthropogenic changes in the composition of the atmosphere or in land use.“ (IPCC 2001, S.788).

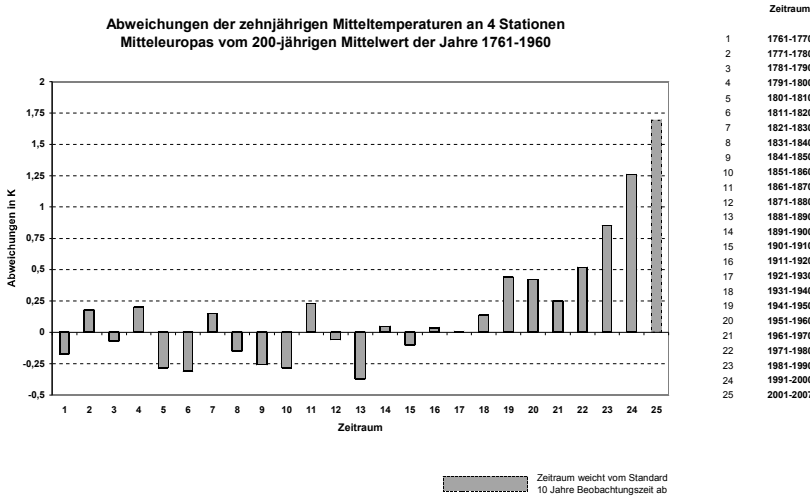

Abb. 3: Abweichungen der zehnjährigen Mitteltemperaturen vom 200-jährigen Mittelwert der Jahre 1761–1960 für Mitteleuropa (Baursche Reihe: Mittelwerte der Stationen Basel, Berlin/ Potsdam, De Bilt und Wien, vgl. Baur 1975, Pelz et.al. 1996, laufend ergänzt in der Berliner Wetterkarte).

Die in der gegenwärtigen Klimadebatte kontrovers diskutierte Frage nach dem Ursprung der weltweiten Klimaänderungen im 19. und 20. Jahrhundert – Abb. 3 gibt ein Beispiel für den Verlauf der Dezennienmitteltemperaturen im mitteleuropäischen Raum – führt im Sinne von Moritz 2008 auf ein „inverses Problem“ der Suche einer „Ursache“ aus der beobachteten „Wirkung“. Im Rahmen der formalen Logik handelt es sich um eine Reduktion, einen logischen Schluß auf intensionaler Grundlage, der hypothetischen Charakter trägt (vgl. Klaus, Buhr 1974, S. 1028ff.), womit auch Fehlschlüsse möglich sind: Eine nasse Wiese kann Folge des Regens, aber auch des Betriebes eines Rasensprengers sein, und letztere Möglichkeit kann nicht mit dem (unbestreitbar zutreffenden!) Hinweis darauf ausgeschlossen werden, daß Wiesen

schon oftmals allein vom Regen benässt worden sind! Ebensowenig taugt der Hinweis auf nicht vom Menschen verursachte globale Klimaänderungen in der Vergangenheit als Argument gegen die (Mit!)Wirkung anthropogener Einflüsse am Klimawandel in Gegenwart und Zukunft, zumal deren Wirkungsmechanismen im Klimasystem klar zutage liegen.

Entscheidend für letztere sind die bereits bei der Charakterisierung des Klimasystems erwähnten positiven Rückkoppelungmechanismen, wie beispielsweise die Schnee- und Eisbedeckung, die mit einer zunächst geringfügigen Erwärmung/Abkühlung zurückgeht/anwächst, woraus infolge verminderter/erhöhter Reflexion der einfallenden Sonnenstrahlung (verminderte/erhöhte Albedo) eine verstärkte Erwärmung/Abkühlung an der Erdoberfläche resultiert; in ähnlicher Weise führt eine Erwärmung/Abkühlung zu erhöhtem/erniedrigtem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und damit zu verstärkter Erwärmung/Abkühlung in der unteren Atmosphäre bzw. an der Erdoberfläche infolge erhöhten/verminderten Treibhauseffektes des Wasserdampfes als des wirksamsten „Treibhausgases".

Diese und weitere Effekte sind gleichermaßen für die hochgradige Sensitivität des Klimasystems gegenüber natürlichen wie anthropogen bedingten Modifikationen der Strahlungsbilanz verantwortlich, die im hier zur Debatte stehenden Zeitbereich von 10^2 bis 10^3 Jahren von der Größenordnung weniger W/m^2 an der Atmosphärenobergrenze sowohl für Schwankungen der Sonneneinstrahlung an der Atmosphärenobergrenze als auch für treibhausgasbedingte Veränderungen der die Erdatmosphäre verlassenden langwelligen Strahlung („radiative forcing") sind, während der raumzeitlich gemittelte solare Strahlungsfluß ca. 342 W/m^2 an der Atmosphärenobergrenze beträgt. Ohne die obengenannten positiven Rückkoppelungen im Klimasystem, wie sie in bezug auf den Albedoeffekt der Eisbedeckung erstmals in den zweidimensionalen Energiebilanzmodellen von Budyko 1969 und Sellers 1969 zutage traten, wären weder die weitreichenden Klimafolgen einer Zunahme der Konzentration strahlungsaktiver „Treibhausgase", aber auch nicht die einer von manchen Autoren (z. B. Malberg 2007, 2008) zur Erklärung der Klimaänderungen im 19./20. Jahrhundert favorisierten solaren Aktivitätsschwankungen erklärbar.

Das betrifft im Zeitbereich von 10^4 bis 10^6 Jahren auch die weiter oben erwähnten Milankovich-Zyklen, die als Taktgeber für die Aufeinanderfolge von Warm- und Kaltzeiten jahrzehntelang mit der scheinbar einleuchtenden Begründung abgelehnt wurden, daß die zugrundeliegenden Schwankungen der Erdbahnelemente ja auch schon in den vielen Jahrmillionen vor dem quar-

tären Eiszeitalter aufgetreten sein müßten. Offensichtlich können die Milankovich-Schwankungen ihre Triggerwirkung nur unter den Bedingungen einer teilweise schnee- und eisbedeckten Erde entfalten, wobei Initiierung und Erhaltung der partiellen Eisbedeckung wiederum mit weiteren zeitlich variablen Strukturen des Klimasystems, wie der Orographie der Erdoberfläche, dem Verlauf der Meeresströmungen und letztlich der Plattentektonik verknüpft sind.

Im Sinne der Einheit von Logischem und Historischem ist also die Geschichte der Klimaforschung hilfreich auch für die Diskussion aktueller Fragen, wie der Sensitivität des Klimaregimes gegenüber natürlichen/anthropogenen Einflüssen, und im Rahmen einer Dialektik des Klimas greifen die Dialektik des Erkenntnisprozesses *in bezug auf* das Klima und die Dialektik *des* Klimasystems, die Dialektik unsres Wissens *über* die und die Dialektik *in* der Natur ineinander.

Auf Details des derzeitigen Erkenntnisstandes über den bisherigen Verlauf der Klimaänderungen in der Epoche regelmäßiger instrumentellen Beobachtungen – im wesentlichen seit dem späten 18. Jahrhundert –, ihre Ursachen und ihren voraussichtlichen weiteren Verlauf soll an dieser Stelle unter Verweis auf die zitierten, im Internet jederzeit verfügbaren Berichte IPCC 1995, 2001, 2007 und eine Fülle daran anschließender Literatur (z. B. Bernhardt 2007, Lanius 2005, 2009, Rahmstorf, Schellnhuber 2007 mit umfangreichen weiteren Zitaten) hier nicht weiter eingegangen werden. Hervorgehoben zu werden verdient aber der Tatbestand, daß die zuletzt vorgelegten IPCC-Ensemble-Modellrechnungen die globalen bzw. hemisphärischen oder festländischen/ozeanischen Klimaänderungen an der Erdoberfläche bis etwa zur Mitte des 20. Jahrhunderts allein unter Berücksichtigung der natürlichen Einflußfaktoren (solarer Strahlungsfluß, Vulkanstaubtrübung), für den anschließenden Zeitraum dagegen nur unter zusätzlicher (!) Berücksichtigung der wesentlich anthropogen verursachten Änderung der Konzentration strahlungsaktiver „Treibhausgase“ in der Atmosphäre befriedigend widerspiegeln. Einige Folgeerscheinungen, wie der weltweite Meeresspiegelanstieg, scheinen sich derzeit rascher und gefahrdrohender zu entwickeln, als nach den Modellrechnungen zu erwarten war (IPCC 2007, vgl. auch Rahmstorf, Schellnhuber 2007, S. 65ff., Spänkuch 2008).

Im folgenden sollen noch einige Überlegungen zur Frage der Zuverlässigkeit der Modellrechnungen (Szenarien, Projektionen), ihrem Vergleich mit der Realität und den Schlußfolgerungen für das praktische Handeln der Gesellschaft(en) angestellt werden.

Abgesehen von der Notwendigkeit, Projektionen in die Klimazukunft für die bekannten unterschiedlichen Szenarien der künftigen globalen gesellschaftlichen Entwicklung, insbesondere der Energiegewinnung, zu entwerfen (deren Wahl ihrerseits auch vom weiteren Verlauf des tatsächlichen Klimawandels beeinflußt werden wird!), was schon einen erheblichen, vom menschlichen Handeln beeinflußbaren Spielraum bedingt, ist die Klimamodellierung auf der Grundlage von Modellen der allgemeinen Zirkulation (GCMs) mit einigen grundsätzlichen Problemen behaftet:

Erstens besteht ein Modellierungsproblem in der adäquaten Erfassung zahlreicher komplizierter Wechselwirkungsprozesse in der Atmosphäre selbst (z. B. Aerosol-Wolken-Strahlungswechselwirkung in der Tropo-, Luftchemie-Strahlungs-Dynamikwechselwirkung in der Stratosphäre) wie auch zwischen der Atmosphäre und den anderen Komponenten des Klimasystems (z. B. Ozean-Atmosphäre, Atmosphäre-Biosphäre u.a.). Die durch theoretische wie experimentelle Untersuchungen erzielbaren Verbesserungen auf diesem Gebiet führen nachweislich zu einer verbesserten Simulation der ozeanisch-atmosphärischen Zirkulation und des derzeitigen Klimaregimes. Grundsätzlich offen bleibt aber die Frage nach der Güte der verwendeten Approximationen, Parametrisierungsansätze usw. bei veränderten Parameterkombinationen, wie einem erhöhten CO_2-Gehalt der Atmosphäre und weiteren modifizierten thermohydrodynamischen, biogeochemischen und anderen Zustandsgrößen sowie Prozeßparametern bzw Randbedingungen

Deutlich wird diese Problematik schon am Beispiel des CO_2-Zyklus selbst: Um das Jahr 2000 (vgl. IPCC 2001, S. 188) stand einem CO_2-Inventar der Erdatmosphäre von etwa 730×10^{12} kg Kohlenstoff ein jährlicher anthropogener Eintrag von ca. $5{,}4 \times 10^{12}$ kg C durch Verbrennung fossilen Kohlenstoffs und Landnutzung (Brandrodung) gegenüber, wovon ca. $2{,}1 \times 10^{12}$ kg C im Ozean und auf dem Festland gespeichert wurden, also ein Nettozuwachs atmosphärischen Kohlenstoffs von ca. $3{,}3 \times 10^{12}$ kg entsprechend einer relativen Zunahme des CO_2-Gehaltes der Atmosphäre von etwa 0,45 % pro Jahr. Der alljährliche natürliche CO_2-Austausch zwischen der Atmosphäre und der marinen und festländischen Biosphäre belief sich aber zur gleichen Zeit auf ca. 210×10^{12} kg C, also auf das über 60fache des anthropogenen Nettoeintrages – mit anderen Worten, eine Schwankung des (im Modell nachzubildenden) natürlichen CO_2-Austausches zwischen Atmo- und Biosphäre um nur 1,6% würde den CO_2-Gehalt der Atmosphäre ebenso stark beeinflussen wie der gesamte anthropogene Nettozufluß im Verlaufe eines Jahres (vgl. auch Bernhardt, Böhme 1994, S. 77)!

Ein zweites grundsätzliches (Vorhersagbarkeits)Problem tut sich auf, wenn die künftige Klimaänderung unter dem gemeinsamen Einfluß natürlicher und anthropogener Faktoren und nicht, wie in früheren Simulationen, nur als Folge menschlicher Aktivitäten (IPPC 1995, S. 48) prognostiziert werden soll. Dies würde neben einer subtilen Modellierung des Einflusses veränderlicher Sonnenaktivität (via Veränderungen des solaren Wellen- und Partikelstrahlungsflusses mit Einfluß auf die atmosphärische Energiebilanz, vor allem auch auf Stratosphärenchemie und -dynamik in Koppelung mit der Troposphäre) und wechselnder Vulkanstaubtrübung (via Einfluß auf Strahlungsflüsse, Aerosol- und Wolkenverteilung) Kenntnis über das zukünftige Verhalten dieser externen natürlichen Antriebsmechanismen für Klimaänderungen erfordern! Im Falle der Sonne scheint dies mit der Weiterentwicklung der Sonnenphysik und auch durch weiteres empirisches Studium der diversen solaren Aktivitätszyklen möglich, in bezug auf künftige Vulkanaktivitäten aber kaum erreichbar, so daß für diesen Teil der Aufgabe wohl nur stochastische Ansätze bzw. die Durchrechnung ausgewählter Szenarien künftiger Vulkanausbrüche bleiben.

Noch schwerwiegender, hier aber nicht im einzelnen abzuhandeln ist ferner die grundsätzliche Frage der Vorhersagbarkeit in komplexen dynamischen Systemen (z. B. Ebeling 1994, Lanius 1995, Ebeling, Lanius 2000). In diesem Zusammenhang sei auf die Ausführungen von Rial et al. 2004 verwiesen, die nach einer ausführlichen Analyse des chaotischen und nichtlinear irregulären Verhaltens des Klimasystems zu dem Schluß kommen, „since the climate system is complex, occasionally chaotic, dominated by abrupt changes and driven by competing feedbacks with largely unknown thresholds, climate prediction is difficult, if not impractible“ (a.a.O., S. 30).

Ob man sich dieser Konsequenz anschließt oder nicht – die Aussagen der Klimaprognosen müssen in dem Maße unsicherer werden, in dem sich das Klimasystem aus dem seit längerer Zeit eingenommenen Bereich des Zustandsraumes in Gebiete entfernt, für die aus der menschheitsgeschichtlichen und auch aus der jüngeren geologischen Vergangenheit keine Analoga mehr existieren (und folglich auch keine Test- bzw. Verifikationsmöglichkeiten für die Modelle gegeben sind).

Damit ist ein drittes Problem der Klimaprognose – das Verifikationsproblem – berührt. Im Gegensatz zur Wettervorhersage, für die seit Jahren ein ausgefeiltes System objektiver Prognoseprüfung existiert und der Modellentwickler sich quasi tagtäglich mit den Ergebnissen seiner Arbeit konfrontiert sieht, beziehen sich Aussagen über Klimaänderungen, die für die jetzt leben-

de oder die nächsten Generationen relevant werden, naturgemäß auf Zeiträume von Jahrzehnten bis mindestens zu einem Jahrhundert im voraus. Für eine Verifikation der verwendeten Modelle ist die befriedigende Wiedergabe des gegenwärtigen Klimaregimes bzw. seiner Veränderungen in der Periode hinreichend zahlreicher und zuverlässiger instrumenteller Beobachtungen eine zwar notwendige, aus den im ersten Problemkreis genannten Gründen aber keine hinreichende Bedingung. Eine Verifikation an Hand historischer bzw. paläoklimatischer Daten erweitert zwar den Prüfbereich für die Modelle auf Zustände des Klimasystems, die weiter vom gegenwärtigen entfernt sind, stößt aber auf Grenzen hinsichtlich der Zuverlässigkeit der empirischen Daten.

Erweiterte Möglichkeiten einer Verifikation von Modellen zur realistischen Simulation von Klimaänderungen unter gemeinsamem natürlichem und anthropogenem Einfluß könnten aus den gegenwärtig anlaufenden Versuchen zur Jahreszeitenvorhersage (z. B. Wehry 2008) bzw. zur „Klima"-Prognose für Jahres/Dezennienzeiträume erwachsen, in denen reale Anfangs- und zeitlich variable Randbedingungen (Ozean) Verwendung finden und für längere Integrationszeiträume auch externe Antriebsmechanismen (variable Sonnenaktivität und „Treibhaus"gaskonzentration) berücksichtigt werden.

Die desungeachtet fortbestehende prinzipielle Unmöglichkeit, eine weit in die Zukunft reichende Prognose (auch in Gestalt von Wahrscheinlichkeitsaussagen) schon heute zu verifizieren, sollte nicht zu der von manchen „Klimaskeptikern" praktizierten grundsätzlichen Ablehnung solcher Projektionen oder ihrer wesentlichen Aussagen führen, sofern diese auf dem aktuellen Stand naturwissenschaftlicher Kenntnis, Datenerfassung und Modellierungstechnik beruhen. Theoretisch begründete Aussagen über ferne Zeiträume (z. B. auch in Astrophysik und Kosmologie) unterscheiden sich ja erkenntnistheoretisch nicht grundsätzlich von Aussagen über bisher unzugängliche Raumbereiche oder noch unerforschte Strukturen. Die Wissenschaftsgeschichte hat Zulässigkeit und Fruchtbarkeit solcher deduktiven Schlüsse hinreichend unter Beweis gestellt, denkt man nur an die später bestätigte Vorhersage bisher unbekannter Elementarteilchen oder an die Anwendungsfelder nichteuklidischer Geometrien!

Verknüpft mit dem Verifikationsproblem ist schließlich viertens das Problem der Klimadiagnostik, das nicht nur beim Vergleich von Modellergebnissen mit den Beobachtungen, sondern bereits bei der Interpretation der letzteren, besonders auch in der Öffentlichkeit, auftritt.

Nach der im zweiten Abschnitt zitierten WMO-Definition des Klimas im Sinne unserer Auffassung vom Klima als einer statistischen Gesamtheit atmosphärischer Zustände und Prozesse in ihrer raumzeitlichen Verteilung (Bernhardt 1987, S. 114) wird das Klima zwar auch, aber nicht allein und vor allem nicht ausreichend durch Mittelwerte charakterisiert. Gerade unter dem Gesichtspunkt der Klimawirkungen sind zeitliche Verläufe, wie Jahres- und Tagesgänge, aber auch Schwankungen und Häufigkeitsverteilungen von meteorologischen Elementen und deren Kombinationen von großer Bedeutung. Das betrifft auch das Andauerverhalten meteorologischer Erscheinungen (z. B. von Hitze-, Kälte-, Dürre- oder Niederschlagsperioden), besonders aber das Auftreten von extremen Parameterwerten, die integrierender Bestandteil eines jeden Klimaregimes sind. Die fortgesetzt erscheinenden „World Climat News“ enthalten regelmäßig Weltkarten verschiedenartiger, im jeweils letzten Kalenderjahr aufgetretener Klimaanomalien und -extreme samt ihrer Auswirkungen (z. B. WMO 2008).

Wenn der momentane Zustand des Klimasystems das Klima als statistische Gesamtheit determiniert, so stellt das zu beobachtende Klima, laut WMO-Definition „characterized by long-term statistics (mean values, variances, probabilities of extreme values, etc.) of meteorological elements in that area“, eine konkrete Realisierung ähnlich einer Stichprobe aus einer Grundgesamtheit dar. Klimamodellierung mittels Langzeitintegration der thermohydrodynamischen Gleichungen bedeutet eine numerisch-experimentelle Simulation aufeinanderfolgender atmosphärischer Zustände (d. h. die Bestimmung einer Trajektorie in einem hochdimensionalen Phasenraum), deren statistische Verteilung das Klima definiert, wie es auf empirischem Wege mittels langzeitiger Beobachtungen, etwa über eine 30-jährige Referenzperiode (z. B. 1961–90) beschrieben werden kann.

Klimaänderungen in der realen Atmosphäre können damit per definitionem erst im nachhinein diagnostiziert werden, wobei eine statistische Signifikanzprüfung (unter Berücksichtigung der Erhaltungsneigung!) darüber Aufschluß gibt, mit welcher „Irrtumswahrscheinlichkeit“ die beobachteten Parameteränderungen im Falle eines konstanten Klimas (d.h. einer unveränderten Grundgesamtheit) aufgetreten sein würden. Eine solche Signifikanzprüfung ist besonders auch zur Beurteilung einer vermeintlich erhöhten Häufigkeit extremer Ereignisse erforderlich, deren Auftreten für sich genommen immanenter Bestandteil eines jeden Klimaregimes ist, wie schon ein elementares Zahlenbeispiel erkennen läßt: Unter der Annahme eines konstanten klimatischen Temperatur-Niederschlagsregimes in einer beispielsweise hun-

dertjährigen Referenzperiode wird jeder der 12 Kalendermonate jeweils vier Extremwerte (extrem warm/kalt, trocken/feucht) in unterschiedlichen Jahren aufweisen, was insgesamt 48 „Jahrhundertmonate“ in bezug auf besonders hohe bzw. niedrige monatliche Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen ergibt. Also wird in nahezu jedem zweiten Jahr ein Jahrhundertmonat („seit Beginn der regelmäßigen Beobachtungen vor 100 Jahren...“) auftreten, auch oder vielmehr gerade dann, wenn sich das Klima (die statistische Gesamtheit) nicht geändert hat! Mit der Hinzunahme weiterer Klimaelemente (Sonnenscheindauer, Schneehöhe etc.) erhielte man noch mehrere solcher „Jahrhundertereignisse“. Einzelne extreme Ereignisse sagen also, für sich genommen, noch gar nichts über eingetretene oder im Gang befindliche Klimaänderungen aus, und noch weniger über deren Ursachen!

Schließlich muß bei der so öffentlichkeitswirksamen Diskussion tatsächlicher oder vermeintlicher Klimaanomalien der regionale Aspekt beachtet werden. So fielen die in Mittel- und Osteuropa extrem strengen Kriegswinter 1939/42 mit einem ersten Höhepunkt der Erwärmung der Arktis und einem ersten Maximum im globalen Temperaturverlauf des 20. Jahrhunderts zusammen (vgl. Abb. 3 bei Ogilvie et al. 2000). Nach der Reanalyse von Brönnimann et al. 2004 handelte es sich dabei um ein El-Niño-Ereignis mit hohen tropischen und niedrigen außertropischen Meeresoberflächentemperaturen, großen positiven Temperaturabweichungen über Alaska, Kanada und Zentralasien bei gleichzeitig starken negativen Abweichungen über Sibirien und besonders über Mittel- und Nordosteuropa. Eine Wiederholung eines solchen oder eines ähnlichen Szenarios als Folge interner Fluktuationen im Klimasystem ist auch im Falle fortdauernder globaler Erwärmung nicht prinzipiell auszuschließen!

Hinsichtlich zu erwartender Reaktionen der Öffentlichkeit sei auf aufkommende Zweifel an der globalen Erwärmung erinnert, als der Januar des Jahres 2006 in Mitteleuropa deutlich kälter als seit Jahren gewohnt ausfiel. In Wahrheit handelte sich dabei um eine zirkulationsbedingte Erscheinung – die Monatsmitteltemperatur auf Svalbard (Spitzbergen) lag in jenem Monat ungeachtet der Polarnacht mit -2,7°C höher als in Berlin-Tempelhof (-3,7°C) oder Wien (-3,3°C), wie den Klimatabellen des DWD 2006 zu entnehmen ist.

Im öffentlichen (wie im individuellen) Bewußtsein wahrgenommene Witterungsanomalien sind primär eine Folge der atmosphärischen Zirkulation und insofern natürlich nicht unabhängig von langzeitigen natürlichen und anthropogenen Trends im Klimasystem, sollten aber nicht vordergründig für jeden Einzelfall auf jene zurückgeführt werden, nicht zuletzt, um Irritationen

beim Eintreffen von Witterungsereignissen zu vermeiden, die den genannten Trends zu widersprechen scheinen. Das Klima eines Ortes, trendbehaftet oder nicht, definiert eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für das in diesem Rahmen zufällige Auftreten von Kombinationen meteorologischer Parameter – das Wetter und seinen Verlauf, im Deutschen als „Witterung“ bezeichnet. (Dem relativ kalten Januar/Februar 2006 folgten übrigens in Mitteleuropa die ungewöhnlich milden Winter 2006/07 und 2007/08, die Börngen, Tinz und Hupfer 2008 an Hand der Berliner Temperaturreihe im Rahmen der auffälligen Häufung milder Winter in den letzten Jahrzehnten betrachtet und in diesem erweiterten Kontext als Ausdruck einer Klimaerwämung interpretiert haben.).

Abschließende Bemerkungen

Die im Rahmen einer Dialektik des Klimas im eingangs umrissenen Sinne zu behandelnde Wechselwirkung zwischen Klima und Gesellschaft schließt natürlich den Einfluß des Klimas als Bestandteil des geographischen Milieus auf die Anthroposoziogenese ein. Unter Hinweis auf die in der Einleitung zitierten Arbeiten sowie auf Klix und Lanius 1999, insbesondere auch auf die Beiträge von Herrmann und Lanius im vorliegenden Sitzungsband und auf unsere eigene Zusammenstellung (Bernhardt 2008) sei hier auf weitere Ausführungen zu dieser Problematik verzichtet, aber eine Bemerkung in bezug auf die Engelssche „Dialektik der Natur“ angeschlossen: Während Engels an mehreren Stellen den Einfluß menschlicher Aktivitäten auf das (lokale und regionale) Klima hervorhob, hielt er Klimaänderungen aus natürlichen Ursachen in historischer Zeit offenbar für unbedeutend, maß aber andererseits der Ausbreitung des Menschen über alle Klimazonen große Bedeutung für die Ausbildung neuer Arbeitsgebiete, Fähigkeiten und Fertigkeiten bei (z. B. MEGA I/26, S. 23, 82, 94, 311, 373, 536, 548). Aus heutiger Sicht scheinen demgegenüber gerade die Klimaänderungen aus natürlicher Ursache, die erst später durch Landnutzung lokal modifiziert wurden, die Entwicklung der Hominiden durch Selektionsdruck und Anpassung entscheidend beeinflußt und insbesondere auch Wanderbewegungen in andere Klimagebiete ausgelöst, erzwungen bzw. ermöglicht zu haben.

Eine besondere Rolle dürfte dabei die Aufeinanderfolge von Warm- und Kaltzeiten des quartären Eiszeitalters mit seine zahlreichen abrupten Klimaschwankungen gespielt haben – schon Herrmann 1987 sprach in diesem Zusammenhang (S. 13-78) vom „kalten Sporn der Eiszeit“ (S. 27).

Es wäre wohl vermessen oder vielmehr verantwortungslos, angesichts heutiger Bevölkerungszahlen und -konzentrationen, darunter in klimasensib-

len Küstenregionen und Flußniederungen, angesichts weltweiter Überbeanspruchung natürlicher Ressourcen, gravierender sozialer Gegensätze und sich verschärfender Verteilungskämpfe auf einen positiven Impuls einer sich beschleunigenden, möglicherweise abrupten Klimaänderung zu hoffen. Im vorangegangenen Abschnitt haben wir, wie schon in einem früheren Stadium der Klimaforschung (Böhme, Bernhardt 1994), auf verschiedenartige (klima)systembedingte Probleme der Klimamodellierung aufmerksam gemacht. Daß deren Ergebnisse vielleicht weniger zuverlässig sind als gelegentlich postuliert, darf ebensowenig wie vor 15 Jahren als Argument dafür dienen, auf die schon damals geforderte Doppelstrategie von Abwehr und Anpassung zu verzichten, die heute eine einprägsame Formulierung mit der Forderung gefunden hat, „das Unbeherrschbare [zu] vermeiden und das Unvermeidbare [zu] beherrschen" (Schellnhuber 2008).

Die Hauptgefahr, das „Unbeherrschbare", besteht unseres Erachtens in der schon weiter oben erwähnten Möglichkeit eines Abdriftens des Klimasystems in Bereiche des Zustandsraumes ohne Analoga aus der menschheitsgeschichtlichen wie auch aus der jüngeren geologischen Vergangenheit – eine Gefahr, wie sie in der Dialektik des Klimasystems mit seinen neuerdings näher untersuchten „Kipp-Punkten" (Lenton et al. 2008, UBA 2008) begründet liegt.

Selbst wenn sich die Aussagen der derzeit vollkommensten Klimamodelle hinsichtlich einer weiteren globalen Erwärmung als übertrieben erweisen, natürliche interne Schwankungen im Klimasystem und/oder externe Faktoren, wie eine Häufung eruptiver Vulkanausbrüche oder ein von manchen Forschern erwarteter deutlicher Rückgang der solaren Energieabgabe, die seit der Mitte des 19. Jahrhunderts zu beobachtende (schubweise verlaufende!) Erwärmung verlangsamen oder vorübergehend umkehren würden – die Rolle des Menschen als geologischer Faktor (Vernadskij) infolge weltweiter Landnutzung, massenhafter Verbrennung fossilen Kohlenstoffes und Emission weiterer strahlungsaktiver Spurengase in die Atmosphäre bliebe davon unbeeinflußt, sofern nicht von der Gesellschaft selbst entschiedene Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Die nachweislich derzeit bei weitem höchste Konzentration strahlungsaktiver Spurengase in der Atmosphäre seit mindestens 650 000 Jahren – über 380 ppm für und über 1750 ppb für CH_4 – müßte sich im Falle einer zeitweiligen Abschwächung oder Unterbrechung der globalen Erwärmung infolge der genannten externen Einflüsse nach deren Abklingen (Vulkanausbrüche)

bzw. Umkehr (solare Zyklen) als eine umso gefährlichere Zeitbombe erweisen und dann einen noch intensiveren neuen Erwärmungsschub provozieren!

Die in jüngsten Pressemitteilungen beispielsweise des Space and Science Research Centre (SSRC) Florida (www.spaceandscience.net) verbreitete Vorstellung eines bevorstehenden „solar hybernation“ erscheint wenig mit physikalischen Fakten unterlegt; vor allem aber wird die daraus abgeleitete Prognose einer „period of deep, long lasting and possibly destructive cold weather“, etwa im Sinne einer Wiederkehr der „Kleinen Eiszeit“ des 16. bis 19. Jahrhunderts, allein auf das Wirken eines einzigen natürlichen Faktors reduziert, ohne die gegenüber früheren Zeiten durch menschlichen Einfluß drastisch veränderten Rand- und Anfangsbedingungen, wie beispielsweise die hohen atmosphärischen CO_2- und CH_4-Konzentrationen, in Rechnung zu stellen.

Eine der wichtigsten Schlußfolgerungen einer Dialektik des Klimas besteht demgegenüber in der Notwendigkeit einer Systembetrachtung des Klimas – also sollten in die Modellsimulationen des künftigen Klimas, wie oben bereits bei der Diskussion des Vorhersagbarkeitsproblems angeregt, auch (deterministische oder stochastische) Ansätze für einen variablen solaren Strahlungsfluß einbezogen werden.

Maßnahmen zur Verlangsamung des bislang ungebremsten Anstieges der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre sind nicht nur zur Verminderung eines unbestreitbar hochwirksamen Antriebes für Klimaänderungen, sondern ebenso unter dem Gesichtspunkt der Bewirtschaftung einer begrenzten nichtregenerierbaren Ressource unausweichlich! Daß derzeit in jedem Jahr Vorräte an fossilem Kohlenstoff verbrannt werden, die in einem erdgeschichtlichen Zeitraum der Größenordnung von einer Million Jahren abgelagert worden sind, unterstreicht zum einen die Rolle des Menschen als geologischer Faktor, charakterisiert aber gleichzeitig die Plünderung eines Planeten durch eine planlos und spontan betriebene, nur am unmittelbaren Nutzeffekt orientierte Wirtschaft – eine in anderem Zusammenhang der Mensch-Umwelt-Beziehungen schon von Engels diskutierte Problematik (MEGA 26, S. 96ff., 550ff.). Ähnliche Betrachtungen ließen sich für andere Umwälzungen der Energie- und Stoffwirtschaft wie auch der Landnutzung anstellen, die gleichermaßen aus ressourcenökonomischen Gründen wie zur Begrenzung anthropogener Eingriffe in das Klimasystem unausweichlich sind.

Die in diesem Kontext antizipierte „dritte industrielle Revolution“ (Schellnhuber 2008) wirft natürlich die Frage nach der adäquaten Gesellschaftsstruktur, den zugehörigen Produktionsverhältnissen auf. Damit wird

eine weitere Seite der Dialektik als der Wissenschaft vom Gesamtzusammenhang aufgeschlagen, die im vorliegenden Beitrag nicht mehr diskutiert werden kann.

Gleiches gilt für ethische Fragen, wie die nach Handlungsmaximen für eine Gesellschaft, die mit ihren derzeitigen Aktivitäten Veränderungen im Klimasystem einleiten oder befördern könnte, deren Auswirkungen im vollen Ausmaß erst spätere Generationen treffen würden. Bedenkenswert ist in diesem Zusammenhang eine Art ökologischer Imperativ im Sinne von Karl Marx, wonach „alle gleichzeitigen Gesellschaften zusammengenommen ... nicht Eigentümer der Erde ...“, sondern „nur ihre Besitzer, ihre Nutznießer“ sind, verpflichtet, „sie als boni patres familias den nachfolgenden Generationen verbessert zu hinterlassen“ (MEW 25, S. 784).

Literatur

Balzer, K.: 150 Jahre wissenschaftlich begründbare Wettervorhersage. Mitteilungen DMG 01(2007), 22-25.

Baur, F.: Abweichungen der Monatsmittel der Temperatur Mitteleuropas vom 210jährigen Mittelwert (1761–1970) in °C. Beilage zur Berliner Wetterkarte 76/75, SO 19/75 (1975), 6 S.

Bernhardt, K.: Gesetz und Bedingung in der Meteorologie. Wiss. Z. d. Humboldt-Univ. Berlin, math.-nat. Reihe 14(1965), 626-631.

Bernhardt, K.: Der Beitrag Hermann von Helmholtz‘ zur Physik der Atmosphäre. Wiss. Z. d. Humboldt-Univ. Berlin, math.-nat. Reihe 22(1973), 331-340.

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

Bernhardt, K.: Wettervorhersage und Meteorologie als exakte Wissenschaft - Anmerkungen aus historischer Sicht. Mitt. d. Arbeitskreises Geschichte der Geophysik d. DGG 17(1998), 26-37.

Bernhardt, K.: Goethe, die Meteorologie – und kein Ende? Sitz.Ber. d. Leibniz-Sozietät 43(2000a)8, 63-104.

Bernhardt, K.: Zur Erforschung der Atmosphäre mit dem Freiballon – die Berliner wissenschaftlichen Luftfahrten (1888–1899). Dahlemer Archivgespräche 6(2000b), 52-82.

Bernhardt, K.: Alexander von Humboldts Beitrag zu Entwicklung und Institutionalisierung von Meteorologie und Klimatologie im 19. Jahrhundert. In: Jürgen Hamel, Eberhard Knobloch, Herbert Pieper (Hrsg.), Alexander von Humboldt in Berlin. Sein Einfluß auf die Entwicklung der Wissenschaften. In: Algorismus. Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften. Heft 41(2003), 195-221.

Bernhardt, K.: Die Berliner wissenschaftlichen Luftfahrten und der Beginn der internationalen Zusammenarbeit zur Erforschung der freien Atmosphäre. Dahlemer Archivgespräche 10(2004), 105-123.

Bernhardt, K.: Die Klimazukunft Europas. IWVWW-Berichte 17(2007), Nr. 176/177, 73-87.

Bernhardt, K.: Klima. In: Haug, F. R., Haug, F., Jehle, P. (Hrsg.): Historisch-Kritisches Wörterbuch des Marxismus 7/I, Hamburg (2008), 1019-1034.

Bernhardt, K., Böhme, W.: Klima und Menschheit. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. (1994)1/2, 51-90.

Bernhardt, K., Kortüm, F.: Beeinflussung der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten. Geodät. Geophys. Veröff. II/21 (1976), 3-62.

Böhme, W.: Beitrag zu Thematik „Klima und Menschheit". Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. 82(2005), 35-44.

Börngen, M., Tinz, B., Hupfer, P.: Natürliche Schwankungen oder Klimawandel? Naturwiss. Rundsch. 61(2008), 283-289.

Brönnimann, S., Luterbacher, J., Staehelin, J., Svendby. T. M., Hansen, G., Svenøe, T.: Extreme climate of the global troposphere and stratosphere in 1940–42 related to El-Niño. Nature 431, 21. Oct. (2004), 971-974.

Budyko, M. I.: The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. Tellus 21(1969), 611-619.

Crutzen, P. I., Stoermer, E. F.: The „Anthropocene". IGBP Newsletter 41(2000), 12.

Dahan-Dalmedico, A**.:** Climate Studies: Rise and Impasses of Global Numerical Models. XXII International Congress of History of Science, Beijing 24-30 July, 2005, Book of Abstracts, 395.

DWD: Deutscher Wetterdienst: Welt-Klima-Rückblick 54(2006), Nr.1, 6-7.

Ebeling, W.: Entropie, Vorhersagbarkeit und nichtlineare Dynamik. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. (1994)1/2, 33-50.

Ebeling, W., Lanius, K.: Zur Vorhersagbarkeit komplexer Prozesse. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz. 42(2000)7, 5-26.

Ede, A.: The International Geophysical Year 1957: The Year the Earth became a Planet. XXII International Congress of History of Science, Beijing 24-30 July, 2005, Book of Abstracts, 399.

Epstein, E. S.: Stochastic dynamic prediction. Tellus 21(1969), 739-759.

Fleming, J. R.. Climate Dynamics, Science Dynamics, and Technological Dynamics 1804-2004. Algorismus 52(2005), 18-22.

Fleming, J. R.: Climate Change and Anthropogenic Greenhouse Warming: A Selection of Key Articles, 1824-1995, with Interpretive Essays. NSDL Classic Articles in Context, Issue 1, April (2008).

Fritscher, B.: The Dialectic of the Atmosphere: Heinrich Wilhelm Dove in Context. Algorismus 52(2005), 91-102.

Handel, M. D., Risbey, J. S.: An annotated bibliography on the greenhouse effect and climate change. Climatic Change 21, 1992, 97-255.

Hantel, M.: Climate modeling. In: Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue Serie, Gruppe V, Band 4, Teilband c. Klimatologie.Teil 2. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, (1989a), 1-116.

Hantel, M.: The present global surface climate, a.a.O., 1989b, 117-474.

Hellmuth, O.: Microphysical Interactions between Cosmic Galactic Rays and Clouds: „Missing Links“ in the Climate Discussion? Hypotheses, Indications and the Difficulties of Enquiry. Part I: The IPCC 2007 perspective. Sitz.Ber.d. Leibniz-Soz. 96(2008), 75-94.

Herrmann, J.: Spuren des Prometheus. Leipzig, Jena, Berlin, 5. Aufl. (1987), 288 S.

Herrmann, J.: Geschichte – Naturgeschichte – Klimatischer Wandel in der frühen Menschheitsgeschichte. Sitz. Ber. d. Leibniz-Soz., vorliegender Band (2009).

Hörz, H.: Der dialektische Determinismus in Natur und Gesellschaft. Berlin (1962), 5. Aufl. 1974.

Hörz, H.: Dialektik als Heuristik. Erwägen Wissen Ethik 17(2006), 167-176.

Hörz, H.: Dialektik der Natur oder der Naturwissenschaft? Anmerkungen zur Antwort von Hans Heinz Holz. Abhandl. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 22(2008a), 107-128.

Hörz, H.: Zur Genese einer philosophischen Theorie. Abhandl. d. Leibniz-Soz. d. Wiss. 25(2008b), 129-152.

Hörz, H. : Zur Balance zwischen rationaler und ästethischer Aneignung der Welt. Anmerkungen zur Klimadebatte. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. d. Wissenschaften 97(2008c), 153-176.

Humboldt, A. v.: Rede, gehalten bei der Eröffnung der Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in Berlin, am 18ten September 1828. Berlin (1828), 9 S.

Humboldt, A. v.: Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Erster Band. Stuttgart und Tübingen (1845), 386 S.

Hupfer, P. (Hrsg.) et al.: Das Klimasystem der Erde. Berlin (1991), 464 S.

IPCC: Climate Change 1995. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, Melbourne (1996).

IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town (2001).

IPCC: Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, Melbourne (2007).
Alle IPCC-Berichte sind auch über htpp://www.ipcc.ch verfügbar.

Jäger, K.-D.: Klimawandel im Holozän – Problemanalyse am Beispiel Mitteleuropa. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. 82(2005), 45-54.

Jäger, K.-D.: Holozäner Klimawandel in Mitteleuropa. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. 88(2007), 103-127.

Klaus, G., Buhr, M. (Hrsg.): Philosophisches Wörterbuch, Bd.2, 10. Aufl., Leipzig (1974),1394 S.

Klimaänderung 2001. Synthesebericht. Bonn (2002), 133 S.

Klinkmann, H., Wöltge, H.: 1992 – Das verdrängte Jahr. Abhandl. d. Leibniz-Soz. 2(1999), 290 S.

Klix, F., Lanius, K.: Wege und Irrwege der Menschenartigen. Wie wir wurden, wer wir sind. Stuttgart (1999).

Klose, B.. Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Berlin, Heidelberg (2008), 396 S.

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

Körber, H.-G.: Die Geschichte des Preußischen Meterologischen Instituts. Geschichte der Meteorologie in Deutschland 3(1997), 71 S.

Lanius, K.: Globaler Wandel. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. (1994)1/2, 7-31.

Lanius, K.: Die Erde im Wandel. Grenzen des Vorhersagbaren. Heidelberg, Berlin, Oxford (1995), 327 S.

Lanius, K.: Szenarien des Klimawandels. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. 82(2005), 11-33.

Lanius, K.: Wieviel Geschichte braucht die Zukunft? Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz., vorliegender Band (2009).

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, L., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J.:Tipping elements in the Earth's climate system. PNAS 105, Febr. 12, (2008), 1786-1793.

Lindzen, R. S.: Überhitzte Prognosen. Cicero Juni (2007), 54-56.

Malberg, H.: Über den dominierenden solaren Einfluss auf den Klimawandel seit 1701. Beitr. d. Inst. f. Meteorol. d. Freien Universität Berlin zur Berliner Wetterkarte 59/07, SO 29/07, 29. 8. (2007), 11 S.

Malberg, H.: Die unruhige Sonne und der Klimawandel. Beitr. zur Berliner Wetterkarte 36/08, SO 20/08, 7. 5. (2008), 8 S.

MEGA: Marx/Engels Gesamtausgabe. I/26 Dietz Verlag Berlin (1985).

MEW: Karl Marx Engels – Friedrich Engels Werke, Dietz Verlag Berlin.

Möller, D.: Das chemische Klima. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. 86(2006), 37-51.

Moritz, H.: Große Mathematiker und die Geowissenschaften: Von Leibniz und Newton bis Einstein und Hilbert. Kolloquium „Wissenschaftliche Geodäsie“ der Leibniz-Sozietät d. Wiss., 14. 11. (2008).

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

Nicolet, M.: The International Geophysical Year 1957/58. WMO Bull. 31(1982), 222-231.

Ogilvie, A. E. J., Barlow, L. K., Jennings, A. E.: North Atlantic climate c. AD 1000: Millenial reflections on the Viking discoveries of Iceland, Greenland and North America. Weather 55(2000), 34-45.

Pelz, J., Rüge, U., Schlaak, P.: Zur Fortführung der von F. Baur im Jahre 1975 veröffentlichten Temperaturreihe für Mitteleuropa ab 1761 und der Niederschlagsreihe

für Deutschland westlich der Oder ab 1851. Beilage zur Berliner Wetterkarte 50/96, SO 14/96 (1996), 3 S.

Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J.: Der Klimawandel. 6. Aufl., München (2007), 144 S.

Rial, J. A., Pielke Sr., R. A., Beniston, M., Claussen, M., Canadell, J., Cox, P., Held, H., de Noblet-Ducoudré, N., Prinn, R., Reynolds, J. F., Salas, J. D.: Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the Earth's climate system. Climatic Change 65(2004), 11-38.

Ruddiman, W.: The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. Climatic Change 61(2003), 261-293.

Schellnhuber, H. J.: Wir brauchen eine Dritte Industrielle Revolution. Germanwatch KlimaKompakt, Spezial Nr. 41/12. 3. (2008), 4 S. htttp:// www.germanwatch.org/kliko/ks41.htm

Schmitz, G.: Klimatheorie und -modellierung. In: Hupfer et a. (1991), 181-217.

Schneider-Carius, K.: Das Klima, seine Definition und Darstellung; zwei Grundsatzfragen der Klimatologie. Veröff. d. Geophys. Inst. d. Karl-Marx-Univ. Leipzig 17(1961)2, 149-222.

Sellers, W. D.: A global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. J. appl. Meteorol. 8(1969), 392-400.

Singer, S. F. (Hrsg.) et al: Die Natur, nicht menschliche Aktivität, bestimmt das Klima. Jena (2008), 98 S.

Spänkuch, D.: Fernerkundung der Erde – Hiobsbotschaften aus dem All. Sitz.Ber. d. Leibniz-Soz. 96(2008), 63-73.

Tatarskij, V. J.: Izpol'zovanie dinamičeskich uravnenij pri verojatnostnom prognoze baričeskoj polja. Izv. AN SSSR, fiz. atmos. i okeana 5(1969), 293-297.

Trenberth, K. E., Houghton, J. T., Meira Filho, L. G.: The climate system: an overview. In: Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg A., Maskell, K. (eds.): Climate change 1995. The science of climate change. Cambridge (1996), 51-64.

UBA (2008): www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/kipp-punkte.pdf

Vernadskij, V. I.: Neskol'ko slov o noosfere. Uspechi sovremennoj biologii. 18(1944)2, 113-120. Deutsch in: Biologie in der Schule 21(1972)6, 222-231.

Wehry, W.: Experimentelle Jahreszeiten – Vorhersagen mittels Wettervorhersage-Modellen für den Winter 2008/09. Beitr. zur Berliner Wetterkarte 72/08, SO 34/08, 27. 11. 2008, 8 S.

WMO: World Meteorological Organization: International Meteorological Vocabulary. Sec. ed. WMO-No. 182. Geneva (1992).

WMO: World Meteorological Organization: World Climate News No. 33, June 2008, S. 10.

Wood, K. R., Overland, J. E.: Climate lessons from the first International Polar Year. Bull. Amer. Meterorol. Soc. 87(2006), 1685-1697.

Nachtrag:

Nach Abschluß der Arbeiten am Manuskript des vorliegenden Beitrages wurde dem Verfasser unter dem Titel „Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Berlin (2008)“, 109 S., eine deutschsprachige Version des vom IPCC ebenfalls im Jahre 2008 veröffentlichten „Climate Change 2007: Synthesis Report“ zugänglich, die bei der deutschen IPCC-Koordinierungsstelle, e-mail info@de-ipcc.de erhältlich ist. Unter der gleichen Adresse angefordert werden kann auch der Titel „Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger“, der eine deutschsprachige Fassung der entsprechenden IPCC-Verlautbarungen darstellt.

Im Ergebnis von Diskussionen und zugleich im Sinne einer Zusammenfassung von Grundgedanken des obenstehenden Beitrages wurden schließlich noch die nachfolgenden Thesen formuliert:

Thesen zur Klimadebatte

1. Das Klima ist die statistische Gesamtheit atmosphärischer Zustände und Prozesse in ihrer raumzeitlichen Verteilung (Synthese des Wetters). Sein Status wird durch die Komponenten des Klimasystems bestimmt, zu dem neben der Atmosphäre selbst die Hydrosphäre, die Kryosphäre, die Pedo- bzw. die Lithosphäre und die Biosphäre einschließlich der Technosphäre (oder Noosphäre) gehören und das gegenüber dem Weltraum offen ist.

2. Das Klimasystem ist ein hochgradig nichtlineares komplexes dynamisches System mit zahlreichen positiven und negativen Rückkoppelungsmechanismen, die eine hohe Empfindlichkeit gegenüber externen Anregungen (Vulkanstaubtrübung, solarer Strahlungsfluß) bedingen, aber auch vielfältige interne Schwankungen hervorbringen. Dies hat Klimaschwankungen in allen Zeitbereichen – von Mega- oder sogar Gigajahren bis herab zu Jahren und Jahrzehnten – zur Folge, so daß der ständige Wandel die „Daseinsweise“ des Klimas ist.

3. Wahrscheinlich existierende multiple Gleichgewichtszustände, kritische Schranken und „Kipp-Punkte“ bzw. -Elemente begünstigen abrupte Klimaänderungen, wie sie zumindest für das seit etwa 2,5 Meagajahren andauernde pleistozäne Eiszeitalter vielfach nachgewiesen, seit etwa 11 000 Jahren – d. h. seit dem Ende der Altsteinzeit – aber im globalen Maßstab nicht mehr aufgetreten sind.

4. Klimaänderungen sind auf Grund längerer (über Jahrzehnte fortgeführter) homogener Datenreihen erst im nachhinein feststellbar, wobei entsprechende statistische Testverfahren erweisen müssen, ob die untersuchten Parameter für die betrachtete Beobachtungsperiode („Stichprobe“) einer anderen statistischen Gesamtheit („Grundgesamtheit“), d. h. einem anderen Klimaregime entstammen als die gleichen Parameter für eine vorangegangene Vergleichsperiode. Das gilt gleichermaßen für Mittelwerte, Häufigkeiten und andere statistische Parameter, insbesondere auch für Extremwerte und -ereignisse, die integrierender Bestandteil eines jeden Klimaregimes sind und deren Auftreten, für sich genommen, nichts über eine Klimaänderung aussagt.

5. Wetter und Witterung wie auch deren Abweichungen vom durchschnittlichen Verlauf und extreme Ereignisse („Anomalien“) werden, namentlich in mittleren und höheren geographischen Breiten, hauptsächlich von der Zirkulation der Atmosphäre und deren Schwankungen geprägt und verlaufen daher in der Regel regional gegenläufig. Demgegenüber wird gegenwärtig – in der Spätphase einer schon etwa 11 000 Jahre währenden Warmzeit (Interglazial) – an der Erdoberfläche eine globale, wenn auch regional unterschiedliche und schubweise verlaufende Erwärmung beobachtet, die im vergangenen Jahrhundert laut IPCC weltweit ca. 0,74 (0,56...0,92) K, in Mitteleuropa aber mehr als 1 K betragen hat.

6. Anthropogene Einflüsse auf das Klimasystem erfolgen über Veränderungen der Erdoberfläche (Landnutzung), Eingriffe in den (Spuren)Stoffhaushalt oder in die Energiebilanz (z. B. Abwärme) der Atmosphäre und anderer Elemente des Klimasystems. Sie umfassen schon seit Jahrhunderten den mikro-, lokal- und regionalklimatischen Bereich (Beispiele: Frostschutz – Stadtklima – Rodung, Bewässerung u. ä.), betreffen aber mit der Einwirkung auf globale Stoffbilanzen (Kohlendioxid, Methan und andere atmosphärische Spurenstoffe) spätestens seit der industriellen Revolution auch das globale Klima.

7. Der gegenwärtige wie der künftige Klimawandel vollzieht sich daher unter dem gemeinsamen Einfluß natürlicher (solarer Strahlungsfluß, Vulkanstaub) und anthropogener Faktoren (Aerosol- und „Treibhaus“gasemission, Landnutzung); menschliche Gesellschaft und (globales) Klimasystem entwickeln sich damit erstmals in interaktiver Wechselwirkung.

8. Der Simulation des gegenwärtigen und (in Gestalt von „Szenarien“ oder „Projektionen“) des künftigen Klimas dienen derzeit hochentwickelte Modelle der atmosphärisch-ozeanischen Zirkulation (GCMs). Während die numerische Integration der entsprechenden Modellgleichungen über kurze Zeiträume (bis zu mehreren Tagen) eine Wettervorhersage – die Berechnung eines künftigen Zustandes der Atmosphäre aus der Kenntnis des Anfangszustandes – gestattet, liefern Langzeitintegrationen aus bekannten Gründen (Chaoscharakter der atmosphärischen Bewegungen) keine verwertbaren Informationen über einzelne atmosphärische Zustände zu bestimmten Zeitpunkten, wohl aber über deren statistische Verteilung – eben das Klima.

9. Klimaprognosen liegen für unterschiedliche Szenarien künftiger Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung, Energiegewinnung und Ressourcennutzung vor. Abgesehen von der Ungewißheit hinsichtlich der in Zukunft tatsächlich realisierten Entwicklungspfade sind auch die Klimasimulationen selbst mit Unsicherheiten behaftet. Diese liegen in der notwendigen Modellierung noch unzureichend erforschter Prozesse im Klimasystem (z. B. Aerosol-Wolken-Strahlungs-Wechselwirkung, Abschmelzvorgänge kontinentaler Eisschilde), in Problemen der Modellvalidierung (für vergangene und für vorausberechnete künftige Klimaregime), in der Reaktion innerer Prozesse (natürlicher Kohlendioxidzyklus, Methanfreisetzung) und in möglichen Einflüssen ungenügend vorhersagbarer äußerer Faktoren (solare Wellen- und Partikelstrahlung, eruptive Vulkanausbrüche) auf künftige Klimaänderungen, letztlich auch in Grundproblemen der Vorhersagbarkeit komplexer dynamischer Systeme begründet.

10. Unsicherheiten der Klimaprognose berühren nicht die Notwendigkeit einer sinnvollen Doppelstrategie von Vermeidung und Anpassung. Die infolge anthropogener Einwirkung derzeit bei weitem höchste atmosphärische Konzentration von Kohlendioxid und Methan seit mindestens 800 000 Jahren stellt auf Grund ihrer Auswirkungen auf den (langwelligen) Strahlungshaushalt einen klimaverändernden Faktor dar, der selbst dann langfristig wirksam bliebe, wenn die jetzige weltweite Erwärmung zeitweilig zum Stillstand käme oder vorübergehend rückläufig würde, wofür es allerdings keine Anhaltspunkte gibt. „Das Unbeherrschbare vermeiden, das Unvermeidbare beherrschen“ erscheint angesichts Bevölkerungswachstum und -konzentration in gegenüber Klimaveränderungen

hochsensiblen Regionen, weltweiter Verteilungskämpfe um begrenzte Ressourcen, schärfster sozialer Gegensätze und politischer Rivalitäten unumgänglich. Das „Unbeherrschbare“ könnte mit einem Abdriften des Klimasystems in Bereiche verknüpft sein, für die es in der jüngeren geologischen Vergangenheit keine Analoga gibt – verbunden vielleicht mit dem Erreichen eines „Kipp-Punktes“ und dem Eintritt einer abrupten Klimaänderung.

Januar 2009