

Von Werner Ebeling und Rainer Feistel

Humboldt-Universität Berlin, Institut für Ostseeforschung Warnemünde

Die Initiative von Karl Lanius, einige Grundfragen unserer Zeit aufzugreifen und zur Diskussion zu stellen, möchten wir sehr begrüßen. Besonders interessant waren für uns die Ausführungen zum Klimaproblem. Im folgenden einige Kommentare dazu, nicht aus der Sicht professioneller Klimaforscher sondern aus der Sicht der Statistischen Physik und Nichtlinearen Dynamik und auch noch ohne gründliche Auswertung der gegenwärtig intensiv geführten Diskussion zum IPCC-Report 2007 (Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change).

Die Evolution des Klimas auf unserem Planeten ist ein, nach menschlichen Maßstäben gemessen, extrem langsamer Prozess, der mit großen Schwankungen behaftet ist. Im Verlaufe der Evolution der Erde hat sich der Zustand der Erdrinde und der Atmosphäre stark verändert. Dabei werden Faktoren der natürlichen Evolution, die durch das Altern der Erde bedingt sind, durch Katastrophen wie starke Vulkanausbrüche, Einschläge großer Meteoriten usw. stark überlagert (Ebeling und Feistel, 1994).

Von einem stationären Zustand kann nicht die Rede sein. Betrachtet man allerdings die letzten 1000 – 10000 Jahre, so erkennt man eine relative Stationarität wichtiger Mittelwerte, die von relativ langsamen Trends überlagert werden. Dazu gehört ein langsamer Anstieg der Temperatur um etwa 2 C seit 1850 der sich nach halbwegs sicheren Prognosen von Experten mindestens noch 100 Jahre fortsetzen wird (siehe „Le Monde, 2007 zum IPCC-Report“).

Der Anstieg hat sich offenbar in der letzten Dekade vergrößert, so dass von heute an gerechnet bis 2100 etwa ein Anstieg der mittleren globalen Temperatur um etwa 3 Grad Celsius herauskommen könnte (Schönwiese et al., 2001, 2003; [www.iht.com/climate/](http://www.iht.com/climate/); Le Monde, 2007 zum IPCC-Report).

Aus unserer Sicht erfordert die genauere Prognose die Beantwortung folgender Fragen:

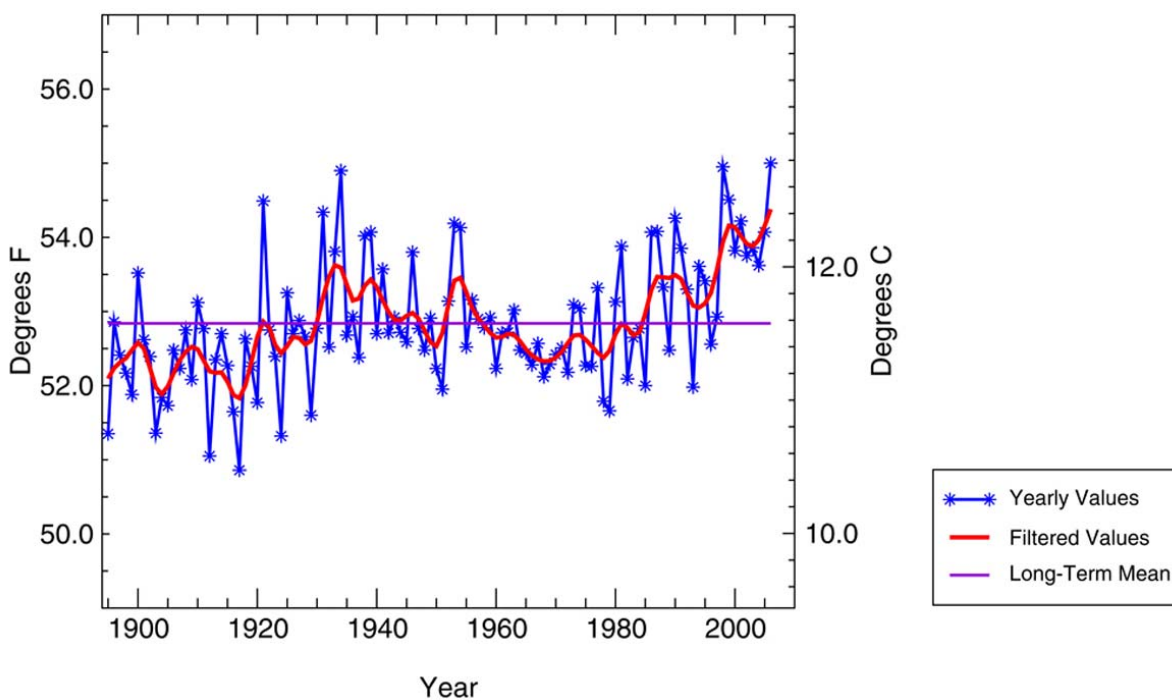
- Hat die Klimadynamik einen stabilen Attraktor im Sinne der nichtlinearen Dynamik?
- Ist die gegenwärtige Klimatrajektorie noch im Anziehungsbereich des `hypothetischen Attraktors? Bewegt sie sich vielleicht schon zum Rande des `Attraktorgebietes hin, bzw. hat sie ihn schon verlassen?
- Sind die beobachteten Änderungen noch als extreme natürliche Schwankungen interpretierbar oder verlassen sie signifikant den langjährigen Schwankungskanal?
- Welchen Faktoren der menschlichen Tätigkeit können die beobachteten systematischen Änderungen des Klimas eindeutig zugeordnet werden?

Karl Lanius hat in seinen Ausführungen die meisten dieser Fragen noch vor dem neuen IPCC-Report eindeutig beantwortet und er hat auf die großen Gefahren dieser Entwicklung hingewiesen. Wir stimmen seinen Argumenten zu, die ja in den letzten Tagen vom IPCC-Gipfel in den meisten Punkten bekräftigt wurden. Andererseits möchten wir auf verschiedene offene Fragen hinweisen und einige Aussagen zuspitzen. Da es für die Menschheit beim Klimaproblem langfristig gesehen um „Leben oder Tod“ gehen konnte, sollten alle Fakten und Argumente sehr sorgfältig hin und her gewendet werden. Die Argumente sollten auch frei von Interessen und vorgefassten Meinungen geprüft werden. In einer neueren Ausgabe der „Herald International Tribune“ ist ein Leitartikel zum IPCC-Report überschrieben mit: „Effects of global warming? Depends on whom you ask“. Sicher ist es schwer, bei einem so belasteten Thema, jede Voreingenommenheit auszuschließen, immerhin sollte das angestrebt werden. Wir sind der Auffassung, dass es auf

dem Gebiet der Klimaprognose noch einen enormen Forschungsbedarf insbesondere zu den Hauptursachen der beobachteten Klimaänderungen gibt.

Es gibt einige Punkte, die besonders dringend weiter erforscht werden müssen. Ein Beispiel ist die Modellierung des hypothetischen Klimaattraktors, der seit Jahrtausenden relativ stabil durchlaufen wird. Aus unserer Sicht gibt es eine diese Prozesse bestimmende nichtlineare Dynamik mit einem Attraktor, der allerdings starken stochastischen Einflüssen ausgesetzt ist. Folglich sollten wir davon ausgehen, dass das Klima ein stochastischer Prozess ist, der einer nichtlinearen Dynamik folgt (Sitzungsber, 1994). Es ist ein gesichertes Erkenntnis, dass Trajektorien stochastischer Prozesse grundsätzlich nicht eindeutig vorhersagbar sind. Alle Vorhersagen sind Aussagen über Wahrscheinlichkeiten, Mittelwerte, Momente usw.

### National (Contiguous U.S.) Temperature 1895 - 2006



National Climatic Data Center / NESDIS / NOAA

Abb. 1: Die mittleren Temperaturen In den USA, berechnet nach Messungen eines Netzwerkes von 1200 Klimastationen (NOAA 2006)

Betrachten wir einige Fragen im Detail, Wir beginnen mit dem Anstieg der mittleren globalen Temperatur. Als Beispiel zeigen wir in Abb. 1 die USA-Temperaturen (NOAA, 2006) im letzten Jahrhundert. Man sieht deutlich einen rapiden Anstieg der Temperaturen seit ca. 1980. Man sieht aber auch einen ähnlich schnellen Anstieg in den 20er und 30er Jahren, der dann von vielen Jahren wieder verringerter Temperatur gekennzeichnet war. Man kann vermuten, dass Ähnliches auch in nächsten Jahren passieren wird, aber das ist natürlich reine Spekulation. Vorhersagen von Temperaturänderungen sind schwierig (Werner et al., 1999). Der langsamere Anstieg über das ganze Jahrhundert scheint aber ein echter Trend zu sein, der wahrscheinlich mit dem Treibhauseffekt zusammenhängt.

Nach den Angaben des IPCC-Reports haben wir eine Kurve für die Wahrscheinlichkeiten einer globalen Erwärmung um eine bestimmte Temperaturdifferenz abgeschätzt (Abb. 2). Die Streuung der (unsymmetrischen) Kurve der Wahrscheinlichkeiten liegt so etwa zwischen 1 Grad und 6 Grad. Die wahrscheinlichste Temperaturerhöhung liegt bei 3 Grad. Die Kurve demonstriert den stochastischen Charakter jeder Klimaprognose und damit auch ihre relative Unsicherheit. Man darf auch nicht vergessen, dass die Angaben aus dem IPCC-Report das Ergebnis einer Abstimmung von Experten sind. Die Wahrheit durch eine Abstimmung zu ermitteln, ist natürlich nicht ohne methodische Probleme. Man stelle sich nur vor, es wäre 1910 von Experten über Einsteins Theorie abgestimmt worden. Es könnten ja durchaus viele Experten falsch liegen, auch wenn wir das keinesfalls unterstellen mochten, es geht hier nur um das Verfahren zur Ermittlung wahrer Aussagen.

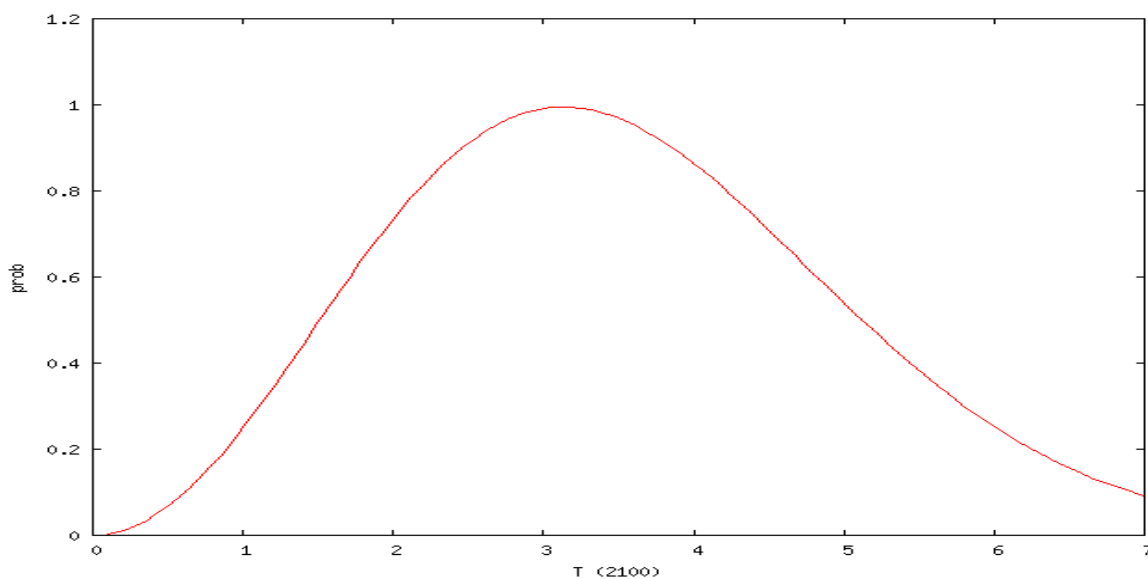


Abb. 2: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit (nicht normiert) für einen bestimmten globalen Temperaturanstieg bis zum Jahre 2100. Die maximale Wahrscheinlichkeit liegt nach dem IPCC-Report bei etwa 3 Grad Celsius, das Intervall zwischen 1 Grad und 6 Grad ist im Bereich der Möglichkeiten, darüber hinaus sind die Wahrscheinlichkeiten des Eintreffens schon recht klein. Man sieht die relative Unsicherheit der Prognose.

Den schnellen Anstieg seit 1980 sehen wir übrigens auch in Warnemünde, allerdings nicht um 2°, sondern nur um 0.3° (siehe Abb. 3). Maritime Einflüsse dämpfen den

### Anstieg der Jahresmitteltemperatur (Treibhauseffekt), Warnemünde 1960 - 2006

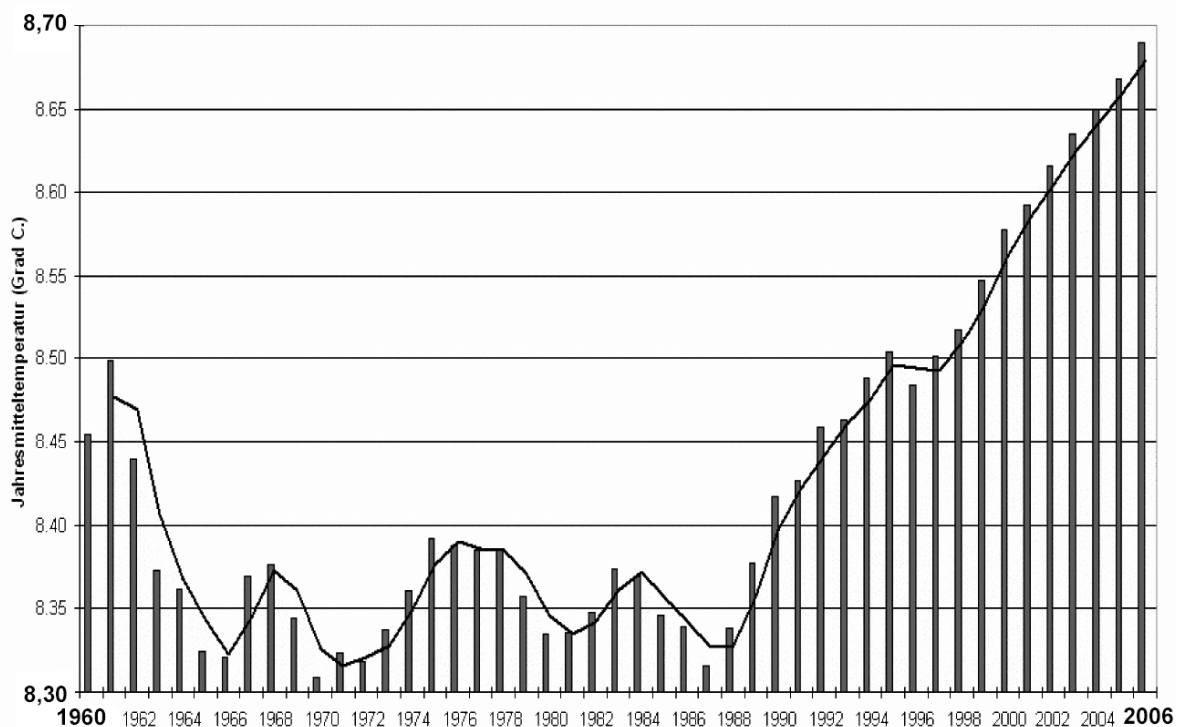


Abb. 3: Anstieg der mittleren Jahrestemperatur in Warnemünde (aus R. Tiesel, 2008, mit freundlicher Erlaubnis)

Temperaturanstieg (Hagen und Feistel, 2008).

Aussagen zur Evolution des Ostseeklimas findet man in einem neueren Buch, an dem einer der Autoren beteiligt ist (Feistel et al., 2008). Nach dem Vorhergehenden und vielen anderen Daten, viele werden von Karl Lanius besprochen, ist es wohl unzweifelhaft, dass es einen deutlichen Temperaturanstieg im letzten Jahrhundert gab, der in den letzten Jahren mit zahlreichen Extremwerten verbunden war.

Es ist auch unzweifelhaft, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre ansteigt. Der von diesem CO<sub>2</sub> ausgelöste direkte Treibhauseffekt kann mit Modellen des Strahlungstransport berechnet werden und beträgt 2.5 W/m<sup>2</sup> (siehe Schönwiese et al., 2001, 2003), also etwa 1% der Photonenmühle (Ebeling und Feistel, 1996).

Weitaus schwieriger sind die indirekten, nichtlinearen Effekte zu ermitteln. Folgen wir zunächst der „linearen Argumentation“, die von den Medien bevorzugt wird: Das CO<sub>2</sub> bewirkt eine Erwärmung der Atmosphäre, die dadurch mehr Wasserdampf aufnehmen kann, was zu verstärkten Unwettern, starken Niederschlägen etc. führt. Das ist offenbar richtig und deckt sich mit der jüngsten Erfahrung. Aber Wasserdampf ist andererseits auch ein sehr starkes Treibhausgas, das den Effekt von CO<sub>2</sub> verstärkt. Also sollte die Temperatur noch schneller ansteigen als allein durch CO<sub>2</sub> verursacht, und es sollte noch mehr Wasserdampf in die Atmosphäre gelangen etc.. Wenn das wirklich (linear) so wäre, dann wäre das Klimasystem instabil gegen thermische Schwankungen, und wir hätten vielleicht auch schon vor der CO<sub>2</sub>-Fluktuation auf der Erde Verhältnisse

wie auf der Venus gehabt. Offensichtlich ist das nicht so. Der Klima-Attraktor war über die Jahrmillionen relativ stabil (Ebeling und Feistel, 1994). Das kann nur sein, weil es starke negative Rückkopplungen im Klimasystem gibt, die die Wirkung der Störung dämpfen. Diese stabilisierenden Rückkopplungen, die vielleicht auf Zeitskalen von Jahrzehnten oder Jahrhunderten wirken, sind weitgehend unbekannt und unverstanden. Und solange das so ist, werden auch unsere Prognosen zur Auswirkung des CO<sub>2</sub> auf das Klima unsicher bleiben.

Betrachten wir einige wichtige Beispiele für solche komplexen Rückkopplungen, die von relativ einfachen direkten Vorgängen ausgelöst werden.

- i. Wolken sind die wichtigsten „Ein- und Auslassventile“ der „Dampfmaschine Erde“ (Ebeling und Feistel, 1994). Sie können kühlend oder wärmend wirken, ja nach Tag oder Nacht, nach Sommer oder Winter, wie das tägliche Wetter es unmittelbar zeigt. Die Strahlungsbilanz der Erde wird maßgeblich in komplizierter Weise durch die Statistik der schnell veränderlichen raum-zeitlichen Wolkenmuster gesteuert. Die Entstehung der Eiskristalle oder Wassertropfen in der Luft erfolgt über Keimbildung, wobei neben dem Wasserdampf auch Aerosole eine entscheidende Rolle als Keime beitragen. Diese entstehen bei Vulkanausbrüchen und Waldbränden, beim Flug- und Autoverkehr, bei Staubstürmen in der Sahara und bei Planktonwachstum im Ozean. Die globale Erwärmung mit den resultierenden Änderungen im Wasserkreislauf, im Windsystem und der Aerosolverteilung wirkt so in sehr komplexer Weise auf ihre Ursache, die gestörte Strahlungsbilanz, zurück.
- ii. Parallel zum raschen globalen Temperaturanstieg in der letzten Dekade intensivierte sich z.B. der Auftrieb von kaltem Tiefenwasser vor Nordwestafrika (McGregor et al. 2007), der von der Stärke des Nordostpassats abhängt. Die reiche „Düngung“ des Planktons mit neuen Nährstoffen aus der Tiefe verstärkt dessen Vermehrung ganz erheblich. Die absterbenden Organismen sinken auf den Meeresgrund und bilden dort massive Schlammschichten, wodurch dort im Endeffekt CO<sub>2</sub> aus der Luft begraben wird. Ähnliche Vorgänge finden an allen Westrändern der Kontinente statt, die in den Passatbreiten liegen. Die Änderungen der Passate spiegeln sich in den langen Zeitreihen der so genannten Klima-Indizes z.B. des Nordatlantik (NAO, Hurrell 1995), des Südatlantik (HIX, Feistel et al. 2003), und sogar der Ostsee (WIBIX, Hagen und Feistel 2005). Diese Reihen weisen weltweit typische gemeinsame Oszillationsfrequenzen mit starken Phasenfluktuationen auf, z.B. Perioden von 15 und von 35 Jahren. Die physikalischen Mechanismen dieser offenbar selbst erregten Schwingungen sind wissenschaftlich noch ungeklärt (Burrows 2003). Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass sie wesentliche Komponenten des Klima-Attraktors darstellen und mit dem Mechanismus seiner asymptotischen Stabilität kausal zusammenhängen.
- iii. Die globale Erwärmung bewirkt das allmähliche Abschmelzen des polaren Meereises. Zurzeit betrifft dieser Vorgang hauptsächlich die Dicke der Eisdecke, aber schon bald wird auch die Größe der eisbedeckten Fläche davon wesentlich beeinträchtigt sein. Dann ist mit einer empfindlichen nichtlinearen Reaktion des Klimas zu rechnen. Zum einen bindet die große Schmelzwärme des Eises heute noch erhebliche Wärmemengen, die sich später als Abweichungen der Temperatur von Wasser und Luft äußern werden, wo heute noch der „Thermostat Meereis“ arbeitet. Genaue thermodynamische Funktionen von Eis und Meerwasser, die die jeweiligen Phasengleichgewichte bestimmen, sind gerade erst in der Entwicklung (Feistel 2003, Feistel und Wagner 2005, 2006). Zum anderen hat dunkles Wasser eine viel kleinere Albedo als Eis, und die globale Strahlungsbilanz wird weiter zugunsten der Erwärmung

verschoben werden. Schließlich bewirkt ein offenes Polarmeer einen starken Austausch von Wasser und Wärme zwischen Ozean und Luft, was das Klima der angrenzenden Landmassen dann wesentlich verändern wird.

- iv. Ein weiterer sensibler Parameter des Klima-Attraktors ist der Meeresspiegel, weil die hypsografische Kurve in der Nähe des jetzigen Wertes einen extrem geringen Anstieg aufweist (Ebeling und Feistel 1994). Durch die zu erwartende zunehmende Überflutung der Niederungen bewirken kleine Änderungen des Meeresspiegels relativ große Veränderungen des globalen Flächenverhältnisses Land-See. Auch dieser Vorgang wird tendenziell zu mehr Verdunstung führen, aber auch zur Dämpfung der mittleren jahreszeitlichen Temperaturzyklen, die wesentlich durch die kontinentalen Extrema bestimmt sind, hin zu milderem maritimen Sommern und Wintern. Da solche Vorgänge in der Erdgeschichte schon mehrfach vorkamen, wobei z.B. die großen Salzvorkommen in der norddeutschen Tiefebene entstanden, ist zu vermuten, dass die Ausdehnung der Meeresoberfläche im Endergebnis eine stabilisierende Rückkopplung darstellt, also der Erwärmung entgegenwirkt. Das mag für die Menschen in den stark besiedelten und bewirtschafteten Flachländern allerdings nur ein geringer Trost sein.

Es ist allerdings wahrscheinlich, dass die beobachtete Erwärmung auf dem Treibhaus – Effekt beruht, denn statistische Analysen deuten auf eine Korrelation zwischen beiden Signalen auch in der Vergangenheit hin. Die kausale Verknüpfung kann aber erst dann als bewiesen gelten, wenn wir die zugehörige Kausalkette genauer kennen und ihre Einzelglieder nachweisen können. Obwohl es immer mehr die Indizien für den Zusammenhang zwischen beiden Beobachtungen gibt, steht nach unserer Auffassung ein Beweis, der alle wichtigen Kausalketten berücksichtigt, noch aus.

Wir möchten unsere Diskussion mit der Forderung abschließen, mehr für die Erforschung der offenen Fragen zu tun, damit die richtigen Maßnahmen begründet und durchgesetzt werden können und auch, um uns besser vor Überraschungen zu schützen. Bei einem so stark stochastisch beeinflussten Prozess sind theoretisch gestützte Aussagen eine wichtige Ergänzung zu den Abstimmungen von Experten, aber das ist „**ein weites Feld**“. Die Leibniz-Sozietät sollte vielleicht erneut zum „Globalen Wandel“ Stellung nehmen, so wie es jüngst Hans Joachim Schellnhuber auf der AAAS-Tagung im Februar 2007 in San Francisco getan hat.

#### Literatur

- 1) W. Ebeling, R. Feistel: Chaos und Kosmos – Prinzipien der Evolution, Spektrum 1994
- 2) „Le Monde“, Ausgabe 31. Januar und vom 3. Februar 2007: Berichte über die letzte Tagung und den Report der Klimaexpertenrunde IPCC.
- 3) C.D. Schonwiese et al.: Klimastatement der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft 2001 und 2003.
- 4) Sammlung von Artikeln und Materialien zum Problem Umwelt und Klima, [www.iht.com/climate](http://www.iht.com/climate)
- 5) Leitartikel „Herald International Tribune“, Ausgabe 02.02.2007.
- 6) NOAA Reports 2006, siehe [www.noaanews.noaa.gov](http://www.noaanews.noaa.gov)
- 7) Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät „Globaler Wandel I“ mit Beiträgen von K. Lanius, W. Ebeling, K. Böhme, K.-H. Bernhardt, L. Kolditz, A. Zimm, Berlin 1994
- 8) P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe, W. Ebeling, Theor.Appl. Climatol. 62 (1999) 125

- 9) R. Tiesel: Weather of the Baltic Sea. In: R. Feistel, G. Nausch, N. Wasmund, State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005. Wiley 2008, in preparation
- 10) E. Hagen, R. Feistel: Baltic climate change. In: R. Feistel, G. Nausch, N. Wasmund, State and Evolution of the Baltic Sea 1952-2005. Wiley 2008, in preparation
- 11) McGregor, H.V., Dima, M., Fischer, H. W., Mulitza, S.: Rapid 20th-Century Increase in Coastal Upwelling off Northwest Africa. *Science* 315 (2007) 637-639
- 12) Hurrell, J., Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation, *Science*, 269, 676-679, 1995.
- 13) Feistel, R., Hagen, E., Grant, K.: Climatic Changes in the Subtropical Southeast Atlantic: The St. Helena Island Climate Index (1893-1999). *Progress in Oceanography*, 59(2003)321-337
- 14) Hagen, E., Feistel, R.: Climatic Turning Points and Regime Shifts in the Baltic Sea Region: The Baltic Winter Index (1659-2002). *Boreal Environment Research*, 10 (2005) 211-224
- 15) Burrows, W.: *Weather Cycles: Real or Imaginary?* Cambridge University Press 2003
- 16) Feistel, R.: A new extended Gibbs thermodynamic potential of seawater. *Progress in Oceanography*, 58/1 (2003) 43-115
- 17) Feistel, R., Wagner, W.: High-pressure thermodynamic Gibbs functions of ice and sea ice. *Journal of Marine Research* 63 (2005) 95-139
- 18) Feistel, R., Wagner, W.: A New Equation of State for H<sub>2</sub>O Ice Ih. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 35, 2 (2006) 1021-1047