
Wolfgang Böhme

Atmosphärische Zirkulation und Chaos – Ergebnisse und Konsequenzen*

1. Einleitung

Der Vortrag konzentriert sich auf die Frage, wie sich in der Atmosphäre Eigenschaften komplexer dynamischer Systeme, also insbesondere solche des deterministischen Chaos widerspiegeln und wie sie auch praktisch genutzt werden können. Ich stütze mich dabei zum Teil auf einen schon früher von mir erarbeiteten Beitrag, den ich auf einer Klimatagung vor etwas mehr als 2 Jahren in Hamburg (Böhme, 1995) zunächst nur als Poster vorgestellt habe. Der gegenwärtige Vortrag geht aus von den wachsenden Anforderungen an die Meteorologie, und von Erkenntnissen über die Atmosphäre und ihre Zirkulation als ein nichtlineares dynamisches System.

Die eigentlichen Aussagen zur Thematik werden betreffen

- Leistungen und Grenzen meteorologischer Vorhersagen
- das Verhalten dynamischer Systeme generell, Anzeichen hierfür in der Atmosphäre und mögliche Konsequenzen
- ein trotz prinzipiell begrenzter Vorhersagbarkeit noch vorhandenes Vorhersagepotential
- ein Beispiel für mögliche Ausnutzung dieses Potentials.

Die Anforderungen, individueller und gesellschaftlicher Art, an die Meteorologie sind schon immer bedeutend gewesen (z. B. Schmauß, 1945), sie haben aber in den letzten Dezennien erheblich zugenommen. Anzeichen und Belege sind u. a.: Zunahme der Bedeutung der Wettervorher-

* Vortrag, gehalten in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 19.03.1998, geringfügig überarbeitete Fassung.

sagen im Fernsehen, deren zeitliche Umgebung ein begehrter Platz für die Werbung ist; Fragen eines anthropogenen Klimaeinflusses global von hoher politischer und präventiver Relevanz. – Die Anforderungen können grundsätzlich als solche für Vorhersagen verstanden werden. Auch in die Zukunft gerichtete Gutachten können bekanntlich als spezielle Art von Vorhersagen aufgefaßt werden, bei denen meist stillschweigend vorausgesetzt wird, daß das Verhalten der Atmosphäre stationär ist, also in der Zukunft so ist wie es in der Vergangenheit war. Die Anforderungen betreffen alle zeitlichen und räumlichen Scales (mikrometeorologische Aussagen, Wetter, Witterung, Klima), wobei eine gewisse Kopplung zwischen zeitlichen und räumlichen Scales existiert.

Die Atmosphäre selbst mit ihrer Zirkulation ist ein komplexes nichtlineares System, daran besteht kein Zweifel; in noch stärkerem Maße ist es das weiter gefaßte Klimasystem. Im einzelnen eröffnet dies aber noch einen weiten Spielraum für das Verhalten und zu Fragen der Vorhersagbarkeit.

Grundsätzlich haben komplexe nichtlineare Systeme eine ganze Reihe interessanter und bedeutender Eigenschaften. Wenn sie von Energie durchströmt werden und sich nicht nahe beim thermodynamischen Gleichgewicht befinden, können sie deterministisches Chaos, Selbstorganisation und Intransitivität aufweisen (letzteres heißt, daß bei gleichen Werten von Systemparametern – z. B. Energiedurchsatz – multiple Gleichgewichtsanworten möglich sind). Klassisch deterministische Systemantworten sind von vornherein unwahrscheinlich, worauf wir (Bernhardt und Böhme, 1994) schon in unserem Vortrag im Jahre 1993 hingewiesen haben. Eine der für praktisch bedeutsame Fragen wichtigen Eigenschaften ist die begrenzte (scalenabhängige) Dauer der Vorhersagbarkeit des Verhaltens solcher Systeme.

Oftmals werden diese und andere auf Nichtlinearitäten beruhenden Eigenschaften an der sehr einfachen sogenannten logistischen Gleichung illustriert oder erläutert (z. B. E. Gassmann, 1991), die in der Biologie u. a. in der Lage ist, Fälle von Populationsdynamik zu simulieren. In der Meteorologie, oder allgemeiner gesagt, in der Hydrodynamik wird zumeist das Lorenzmodell bemüht, das im Jahre 1963 von Lorenz für Konvektionssysteme aufgestellt wurde. Lorenz brachte damit (allerdings geschah dies nur allmählich) die Erforschung nichtlinearer komplexer

Systeme überhaupt ins Rollen (z. B. Fraedrich, 1996). Das System wird durch das Gleichungssystem

$$\begin{aligned}\dot{X} &= -\sigma(X - Y) \\ \dot{Y} &= rX - XZ \\ \dot{Z} &= -bZ + XY\end{aligned}$$

beschrieben, wobei durch den aufgesetzten Punkt die Zeitableitungen charakterisiert sind. Die Systemvariable X ist ein Maß für die Intensität der konvektiven Bewegung, Y für die Temperaturdifferenz zwischen auf- und absteigender Strömung und Z für die Abweichung (Störung) des vertikalen Temperaturprofils von der Linearität. Die Parameter σ , r und b entsprechen der Prandtl-Zahl, der Rayleigh-Zahl und einer geometrischen Eigenschaft der „Versuchsanordnung“. Die Systemvariablen X , Y , Z können als sogenannte Phasen- oder Zustandsvariable des Systems verstanden werden, d. h. aufeinanderfolgende Zustände des Systems, also Trajektorien des Systems, werden in einem 3-dimensionalen Phasenraum dargestellt. Bereits die Projektion dieser Trajektorien z. B. auf die Y - Z Ebene (für $r = 28$, $\sigma = 10$, $b = 8/3$) in Abb. 1 zeigt einen charakteristischen Verlauf dieser Zustandstrajektorien.

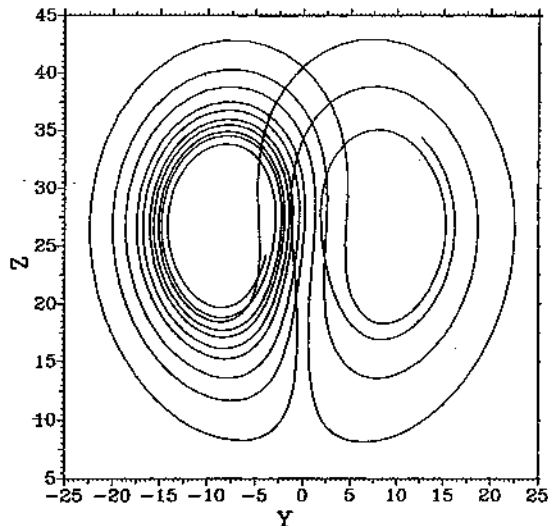


Abb. 1: Teil einer Trajektorie des Lorenzattraktors in der Y - Z -Ebene für die Parameter $r = 28$, $\sigma = 10$ und $b = 8/3$ (aus Ziehmann-Schlumbohm, 1994).

Wenn r kleiner ist – unter einer kritischen Rayleighzahl, die bei 24 liegt – sind die Zustandsfolgen (d. h. die entsprechenden Lösungen des Gleichungssystems in diesem Phasenraum) stabile Fixpunkte und zwar die Mittelpunkte der sogenannten „Augen“ oder einfachere geschlossene Bahnen um die Augen.

Bei $r > 24$ erfolgt die Bewegung des Zustands längs dieser Zustands-trajektorien, wobei die beiden Augen zu instabilen Fixpunkten geworden sind. Die so verstandene Lösung des Gleichungssystems (der sogenannte Lorenzattraktor) nimmt in diesem 3-dimensionalen Phasenraum einen sehr kleinen Teilbereich mit einer fraktalen Dimension ein, die nur wenig größer als 2 ist. Wir kommen auf diesen Attraktor und seine Eigenschaften noch zurück; kleinste Unterschiede am Anfang oder Störungen auf der Bahn (durch Forcing) entscheiden darüber, ob und wann der Umlauf um den einen Fixpunkt in einen Umlauf um den anderen übergeht, obwohl jede dieser Lösungen bei exakt gegebenem Anfangswert (oder exakt gegebenen Störungen) sich deterministisch verhält.

Die Frage ist natürlich, ob die Aussagen vom Lorenzmodell in verallgemeinerter Form auf die atmosphärische Zirkulation übertragen werden können.

2. Leistungsfähigkeit und Grenzen von meteorologischen Vorhersagen

Fest steht: die Gleichungen der atmosphärischen Thermohydrodynamik, die wesentlich komplexere Vorgänge numerisch beschreiben können als sie das Lorenzmodell liefern kann (die aber prinzipiell eher in dem üblichen Zeit-Raum-Rahmen und nicht in einem Phasenraum betrachtet und gelöst werden), sind für die Wetter- und Witterungsvorhersagen in den letzten 40 bis 50 Jahren mit deutlich zunehmendem Erfolg gelöst worden. Heute sind Vorhersagen über 6 bis 7 Tage so gut wie vor 40 Jahren diejenigen über etwa 1,5 Tage. Für den Fortschritt im Zeitraum ab 1980 ist die Abb. 2 ein Beleg, die ich einer Arbeit von Ehrendorfer aus dem Jahre 1997 entnommen habe. Die Korrelation der vorhergesagten Anomalienverteilung der Höhe der 500 hPa-Fläche mit der eingetretenen Anomalienverteilung wird hierzu benutzt, und zwar in etwas indirekter Weise: Ver-

wendet wird der Vorhersagezeitpunkt (in Tagen), zu dem dieser Korrelationskoeffizient für die Vorhersagen des ECMWF (Europäisches Mittelfristvorhersagezentrum in Reading (UK)) das erste Mal den Wert von 0.6 unterschreitet. Mit diesem Wert wird eine Grenze erreicht, wo die Vorhersage nahezu wertlos wird. Man sieht, daß der Zeitraum, in dem eine Vorhersage durchschnittlich noch nutzbar war, sich von 1980 bis 1996 von etwa 5 auf 7 Tage erhöht hat.

ECMWF FORECAST VERIFICATION 12Z
500hPa GEOPOTENTIAL
 ANOMALY CORRELATION FORECAST
 N.HEM LAT 20.000 TO 90.000 LON -180.000 TO 180.000

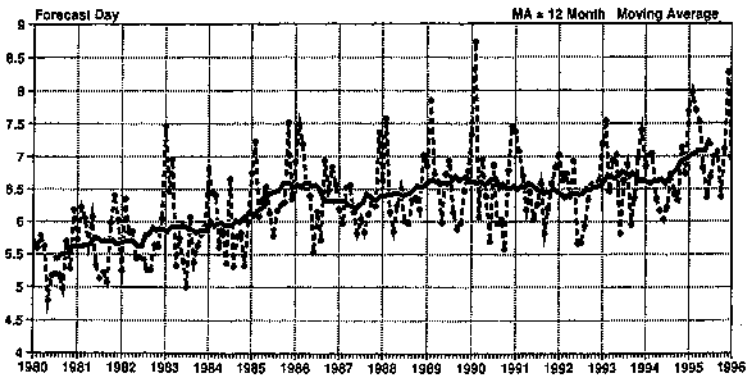


Abb. 2: Entwicklung des Vorhersagezeitpunktes (in Tagen), zu dem der Anomaliekorrelationskoeffizient für die ECMWF-Vorhersage des 500 hPa-Geopotentials im Gebiet der extratropischen Nordhemisphäre den Wert 0,6 unterschreitet, im Zeitraum 1980 bis 1996. Die unterbrochene Kurve zeigt die Monatswerte, die durchlaufende Kurve den 12-monatigen gleitenden Mittelwert. Aus Ehrendorfer, 1997.

Das bisherige Erfolgskonzept (im wesentlichen verbesserte Auflösung, exaktere Formulierung des Modells und verbesserte Benutzung der Anfangsdaten) ist wohl weitgehend ausgeschöpft und reicht insbesondere für die Behandlung des Problems der Langfristvorhersage, für einen Monat oder ein oder mehrere Jahreszeiten, nicht mehr aus.

Es gibt zumindest 3 verschiedene Arten von den weiteren Fortschritt prinzipiell begrenzenden Faktoren:

(1) Die Genauigkeit der **Anfangswerte**, die für die Integration der die Vorgänge beschreibenden mathematischen Gleichungen notwendig sind, ist grundsätzlich begrenzt.

(2) Die **Modelle** enthalten (trotz aller Feinheiten und Komplexität, die jetzt erreicht worden sind) notwendigerweise Annahmen, Näherungen und Vernachlässigungen, die auch und gerade die Systemparameter (Stellparameter) betreffen können. – Im übrigen ist die Modellmannigfaltigkeit sehr groß. Man muß stets beachten: „Modellatmosphären (bzw. Modellklimasysteme) und Natur sind nichtidentische nichtlineare Systeme.

(3) In komplexen nichtlinearen Systemen führen (mikroskopisch) kleine Zustandsschwankungen infolge „**interner Instabilitäten des Systems**“ nach dem Prinzip „kleine Ursachen – große Wirkungen“ zu späteren Zuständen, die nicht mehr wesentlich von früheren (Anfangs-)Zuständen abhängen (nach etwa 7–8 Tagen Vorhersagezeitraum unterscheidet sich im Durchschnitt der Zustand nicht mehr vom Klima (d. h. von der Gesamtheit der Zustände zur gleichen Jahreszeit). – Die „mikroskopische“ Problematik hängt mit **Bifurkationspunkten** zusammen, in deren Nähe sozusagen 'mangels deterministischer Vorschriften im dynamischen System die Entscheidungskompetenz ... nach unten bis in den mikroskopischen Maßstab hinunter „delegiert“ wird, wo die Entscheidung dann aufgrund der immer vorhandenen thermischen Fluktuationen ohne Sicht für das Ganze rein zufällig getroffen werden' (Gassmann, 1991).

Man muß beachten: Der Faktor (3) wirkt grundsätzlich unabhängig von den Ursachen (1) und (2). (3) ist kein Fehler der Modelle, sondern bedingt durch Eigenschaften des Systems; der Faktor (3) ist also auch nicht durch verbesserte Modelle und verbesserte Genauigkeit der Anfangswerte zu beseitigen.

3. Das Verhalten dynamischer Systeme generell und Anzeichen hierfür in der Atmosphäre

Das Lorenzsystem ist schon viel komplizierter als die oftmals für die Einführung in die nichtlinearen Systeme benutzte logistische Gleichung; andererseits ist aber das Lorenzsystem viel einfacher als das Gesamtsys-

tem der atmosphärischen Dynamik oder gar das Klimasystem, also die atmosphärische Wirklichkeit; hinzu kommt noch, daß die Eigenschaften stark von der Entfernung vom voll entwickelten Chaos (das mit dem Zufallsrauschen gleichgesetzt werden kann) abhängen. Es ist also nicht von vornherein klar, ob sich die Atmosphäre z. B. ähnlich wie das Lorenzsystem verhält, also u. a. deterministisches Chaos zeigt.

Es gibt aber viele Anhaltspunkte dafür. Natürlich existieren sehr viele verschiedene Eigenschaften komplexer dynamischer Systeme, die als Belege dienen können, z. B. kommen infrage:

- Abhängigkeit des Fehlerwachstums vom eingenommenen Systemzustand
- Nichtstabile Perioden im Zustandsablauf
- Vereinfachtes Auffinden von Eigenschaften des Systems beim Übergang zu Darstellungen im Phasenraum
- Kopplung Gesamtsystem – Teilsysteme, einschließlich solcher die durch Selbstorganisation entstehen
- Charakteristische Phasenbeziehungen zwischen verschiedenen Teilsystemen
- Hohe Stabilität angeregter Zustände
- Quasipermanente quasiperiodische Oszillationen, in der Atmosphäre z. B. südliche Oszillation bzw. El Niño
- Weitere Folgen solcher Oszillationen (z. B. Auftreten von Symmetrieerscheinungen)
- Bedeutung der Stabilität (z. B. der statischen Stabilität) als charakteristischer Systemparameter)

Auf eine Auswahl dieser Eigenschaften wird im folgenden eingegangen.

(1) Fehlerwachstum in Abhängigkeit vom Ort im Phasenraum

Das Fehlerwachstum (also auch die Vorhersagbarkeit) variiert im Phasenraum, d. h. es hängt vom Zustand des Systems ab. Dies wurde z. B. am Lorenzsystem gezeigt (aber auch an anderen nichtlinearen Systemen). In der Abb. 3 sind die Fehlerverdoppelungszeiten, gekennzeichnet durch unterschiedliche Grautöne (im Original von Ziehmman-Schlumbohm, 1994,

farbig) für verschiedene Startpunkte auf dem Lorenzattraktor dargestellt. Die dunkelsten Grautöne haben die größten Verdoppelungszeiten. Man sieht, daß an den Rändern des Attraktors das Fehlerwachstum am langsamsten vorsichgeht.

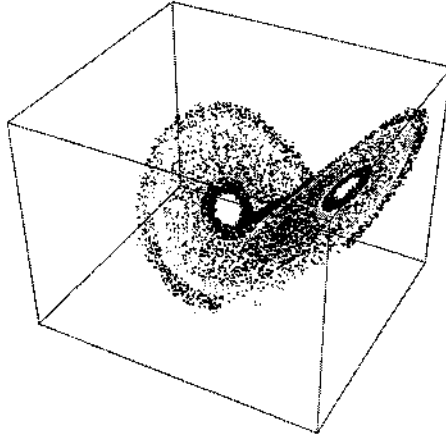


Abb. 3: Fehlerverdoppelungszeiten, gekennzeichnet durch unterschiedliche Grautöne (s. Text) für verschiedene Startpunkte auf dem Lorenzattraktor. X ist nach rechts, Y nach hinten und Z nach oben gerichtet (nach Ziehmann-Schlumbohm, 1994, Abb. 2.17).

Aus der Meteorologie ist ebenfalls gut bekannt, daß die Vorhersagbarkeit z. B. stark von der Großwetterlage abhängt. Die Entstehung von Blockierungslagen (Blockierung der Westdrift) ist bekanntlich schwer vorhersagbar. Bei Existenz einer solchen Lage ist die weitere Entwicklung jedoch viel besser und länger vorhersagbar.

(2) Nichtstabile Perioden im Zustandsablauf

Nichtlinearität der Gleichungen eines komplexen Systems manifestiert sich im Auftreten periodischer und quasistabiler (zeitweilig vorhandener) periodischer Lösungen bis hin zum Chaos (s. auch Lanius, 1995). In stärker chaotischen komplexen Systemen treten periodische Abläufe allerdings nur selten über längere Zeitabschnitte auf. Die Trajektorien im

Zustandsraum folgen periodischen Verläufen (unterschiedlicher Periode) oft nur über kurze Abschnitte. Auch vielfältige „äußere“ Störungen verhindern einen vollen Durchlauf offensichtlich.

Für die Atmosphäre ist bekannt, daß Perioden (abgesehen vom Tages- und Jahresrhythmus, die dominieren, und den Gezeiten, die eine geringe Amplitude besitzen) meist nur kurze Zeit (oftmals nicht einen vollen Zyklus lang) bestehen, also stark labil erscheinen. Ich selbst habe gefunden, daß Analogien im Jahresablauf meist nur über wenige Wochen (wenn es gut geht über wenige Monate) durchhalten.

Mit der häufig empfindlichen Abhängigkeit der Attraktorenstruktur von Systemparametern wird auch klar, warum hoch entwickelte statistische Vorhersageverfahren relativ rasch ungültig werden können oder sogar (nach einer kurzen Übergangszeit) das Gegenteil liefern.

(3) Vorteil beim Übergang zum Phasenraum

Reale komplexe Systeme (vor allem solche aus der Kontinuumsphysik) scheinen im Orts- und Zeitkontinuum, wenn man an die sie beschreibenden Differentialgleichungen denkt, eine hohe Anzahl von Freiheitsgraden zu haben. Sie haben aber auch viele innere und externe Bedingungen zu erfüllen, was eigentlich die Zahl der Freiheitsgrade erheblich zu reduzieren vermag. Natürlich ist man bei der Untersuchung von komplexen Systemen daran interessiert, die Freiheitsgrade sinnvoll zu reduzieren. Das Wesen ist schon an der Konvektion zu sehen:

In der Tat kommt man bei zweckmäßig gewählten Phasenkoordinaten, wie das Lorenzmodell zeigt, mit 3 Freiheitsgraden oder Phasenkoordinaten aus und kann damit eine große Mannigfaltigkeit von Lösungsverhältnissen repräsentieren. Wichtig ist hierbei sicher eine günstige, zweckentsprechende Auswahl der Phasenkoordinaten. Ich konnte, wie wir schon einmal Ende 1993 beiläufig (Bernhardt und Böhme, 1994) berichteten, für die Atmosphäre zeigen, daß man für den Nachweis von langanhaltenden Auswirkungen von eruptiven, bis in die Stratosphäre reichenden Vulkanausbrüchen schon mit 2 Phasenkoordinaten auskommt (Böhme, 1993 und 1994a), nämlich mit den 1. zeitlichen Ableitungen der troposphärischen N- und S-Hemisphärentemperatur (genauer gesagt, den interannuellen Änderungen dieser Temperaturen). Sicher ist dies nur eine Projektion aus

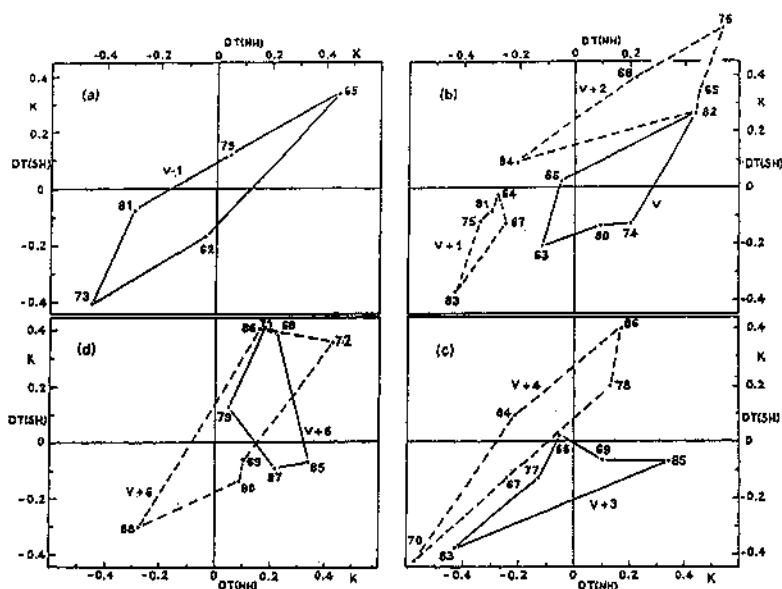


Abb. 4: Flächen $V + i$, die von dem Ensemble der 5 stärksten Vulkanausbrüche des Zeitraums 1958 bis 1988 für i von -1 bis $+6$ in der Phaseebene der interannuellen Änderungen der Temperatur der Troposphäre der Nordhemisphäre $DT(NH)$ und der Südhemisphäre $DT(SH)$ eingenommen wird. $-V =$ Jahr des Vulkanausbruches, $DT(V + i) = T(V + i + 1) - T(V + i)$.

dem allgemeineren höherdimensionalen Phasenraum atmosphärischer Vorgänge auf eine günstig ausgewählte Phaseebene. Sie werden sich vielleicht an die Abbildung 4 erinnern. Ich wiederhole sie hier. Sie hat im gewissen Sinne eine Schlüsselfunktion. In der Abb. 4 ist also die x-Ordinate die interannuelle Änderung der troposphärischen Nordhemisphären-temperatur, die y-Abszisse die entsprechende Südhemisphären-temperatur. In jeder der 4 Teilabbildungen, sind die Verhältnisse für ein Ensemble von 5 extremen Vulkanausbrüchen aus der Periode 1958–1988 für bestimmte Zeiträume in der zeitlichen Umgebung der Ausbrüche dargestellt, in der Teilabbildung links oben für die Änderungen der Hemisphären-temperaturen vom Jahr vor dem Ausbruch zum Ausbruchsjahr (bezeichnet mit $V1$). Die Verteilung entspricht etwa der durchschnittlichen Verteilung,

wenn man 5 Jahre zufällig auswählt. Rechts daneben sind die Verhältnisse jeweils ein Jahr später. Man sieht, daß die von den 5 Punkten (Ausbrüchen) aufgespannte Teilfläche in der Phasenebene eine Rotation im Uhrzeigersinn durchführt, die zumindest bis zu $V + 5$ (also den Änderungen vom 5. zum 6. Jahr nach den Vulkanausbrüchen) reicht. Noch augenfälliger ist aber die Kontraktion der aufgespannten Flächen fast auf einen Punkt bei $V + 1$ (also bei den Änderungen vom Jahr $V + 1$ zum Jahr $V + 2$). In der gewählten Projektion des Phasenraums wird dies für alle 5 Ausbrüche fast ein einheitlicher Zustand, der sozusagen Attraktoreigenschaften (bedingter Attraktor) hat. Mit einer Monte-Carlo-Methode konnte gezeigt werden, daß ein solches Verhalten hochsignifikant ist. Im übrigen wird erst bei $V + 7$ etwa die Form der ungestörten Verteilung wieder erreicht. Es wird also ein spezielles atmosphärisches Zustandsverhalten angeregt, das in der benutzten Projektion des Phasenraumes wenigstens bis zum 6. Folgejahr besteht! Beim El-Niño-Phänomen sieht es ganz anders aus; ich komme darauf später zurück.

(4) Kopplung von Gesamtsystem und Teilsystemen, einschließlich solcher, die durch Selbstorganisation entstehen

Teilsysteme und Gesamtsystem können sehr unterschiedlich gekoppelt sein. Enge Kopplungen sind aber häufig und auffällig und schon aus dem Systembegriff heraus und auch wegen der Selbstorganisation zu erwarten. Von großen Vulkanausbrüchen angeregte typische Schwankungen finden sich jedenfalls auch in den interannuellen Änderungen der mitteleuropäischen Wintertemperatur. Dies zeigt die Abb. 5. Die unterbrochene Linie gibt das Ensemblemittel der interannuellen Änderungen der mitteleuropäischen Wintertemperatur für die größten 5 Ausbrüche zwischen 1958 und 1988 wieder, die ausgezogene Linie das Mittel für das aus 11 Mitgliedern bestehende Ensemble zwischen 1879 und 1957. Das Verhalten ist erstaunlich stabil geblieben. Auch der Effekt des Pinatuboausbruchs paßt weitgehend hinein. Für etwa 5 Winter nach einem heftigen Vulkanausbruch sind demnach deutliche Anzeichen für ein stabiles prognostisches Potential vorhanden.

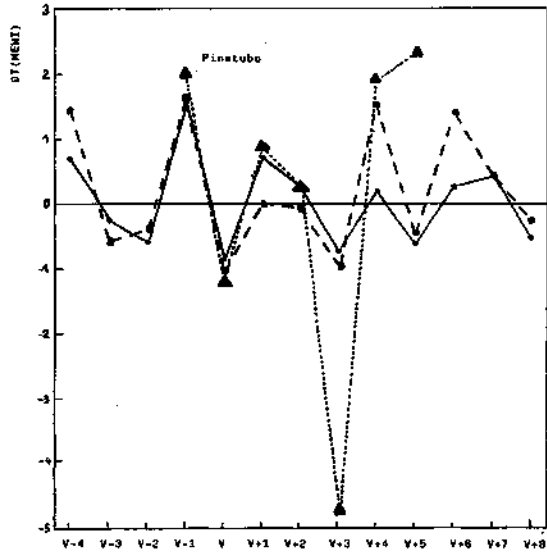


Abb. 5: Ensemblemittel der interanuellen Änderungen der mitteleuropäischen Wintertemperatur $DT(MEWI)$ für die stärksten Vulkanausbrüche zwischen 1958 und 1988 (unterbrochene Linienzug) und die 11 stärksten Vulkanausbrüche zwischen 1879 und 1957 (durchlaufender Linienzug). Die Dreiecksmarkierung und der punktierte Linienzug beziehen sich auf den Pinatuboausbruch 1991.

Ich fand – wie ein Vergleich der Abb. 4 mit 5 zeigt –, daß die ausbruchsbedingte Störung der troposphärischen Nordhemisphärenmitteltemperatur $0,3^\circ \text{ K}$ beträgt, während die Störung der Wintertemperaturen über der kleinen Region Mitteleuropa etwa die Größe von 2° K hat (jeweils etwa 50% des von der Variabilität überspannten Gesamtbereiches). Ich stellte schon 1993 fest: „Die relativ gleiche Größenordnung der Auswirkungen stützt die Schlußfolgerung, daß die Antwort der Atmosphäre ... ganzheitlich ist in dem Sinne, daß die globalen Änderungen mit weitgehend bestimmten regionalen Änderungen mehr oder minder zwangsläufig einhergehen“. Die beobachtete größere Streubreite der regionalen Ergebnisse von Klimamodellen widerspricht dem nicht, sie hängt wahrscheinlich mit den unterschiedlichen Modelleigenschaften und den damit verbundenen unterschiedlichen Modellfehlern zusammen.

(5) Bemerkungen zur hohen Stabilität angeregter Zustände

Durch eine drastische Störung und einer damit zusammenhängenden Änderung eines Systemparameters über einen kritischen Wert hinweg kann ein anderes Verhalten entstehen. Wenn aber erst einmal ein neuer Mode existiert, kann er sich trotz vieler zufällige Störungen relativ lang erhalten. Das ist erstaunlich, aber erklärbar: Etwas drastisch formuliert, ist es etwa so, als solle man ein nahezu reibungsfreies Pendel durch zufällige Impulse am Angriffspunkt des Pendels zur Ruhe bringen. Eine lange Nachweisbarkeit eines angeregten Zustandes ist übrigens auch schon beim nur einfach angeregten Reagieren des Lorenzsystems der Fall. Die Abb. 6 zeigt die Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $\psi(x)$ im Lorenzsystem eines Ensembles anfänglich sehr nahe beieinander liegender Lösungen.

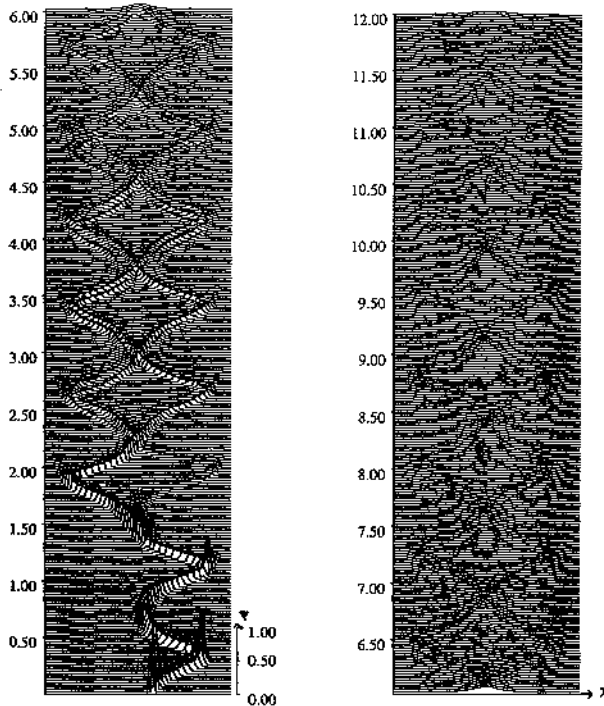


Abb. 6: Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $\psi(x)$ eines Ensembles anfänglich sehr nahe beieinander liegender Lösungen des Lorenzsystems (aus Smith, 1995).

Bei der Untersuchung des Verhaltens der Atmosphäre nach massiven Vulkanausbrüchen haben wir ähnlich feststellen können oder müssen, daß der angeregte Mode trotz der ständig in der Atmosphäre angreifenden Störungen sich nur sehr langsam abschwächt, langsamer als es bei dem Ausfall des stratosphärischen Aerosols zu erwarten ist. Eine weitere Untersuchung, auf die ich hier im einzelnen nicht eingehen will, hat sogar gezeigt, daß es offenbar bestimmte Projektionen des Phasenraumes (z. B. die zweiten interannualen Änderungen der mitteleuropäischen Sommertemperatur) gibt, die ein Signal noch nach mehr als 10 Jahren widerspiegeln, dann sogar noch verstärkt! Die große Amplitude um 11 Jahre nach dem Vulkanausbruch ist ein Hinweis auf eine möglicherweise bestehende inhärente, etwa 11jährige Schwankung der atmosphärischen Zirkulation. Für ein Wirken der Sonnenaktivität gibt es kaum Anzeichen; nur 2 der Ausbrüche des 5er-Ensembles und 2 Paar der Ausbrüche des 11er-Ensembles hatten voneinander einen elfjährigen Abstand.

(6) Quasipermanente quasiperiodische Oszillationen

Komplexe nichtlineare Systeme zeigen – wie schon bei (2) angedeutet – oft ein quasiperiodisches Verhalten, wobei die quasiperiodischen Oszillationen auch (fast) permanent sein können. Unter quasiperiodischem Verhalten verstehen wir das Auftreten von Abläufen, die an streng periodische Abläufe erinnern, wobei aber die Perioden (und zumeist auch die Amplituden) selbst nicht konstant sind, sondern ziemlich stark variieren; die Periodenschwankungen nehmen dabei im allgemeinen nur einen begrenzten Frequenzbereich ein.

Im Klimasystem ist die bekannteste quasiperiodische Fluktuation die südliche Oszillation (SO = southern oscillation) mit dem Schwerpunkt im pazifischen Ozean. Sie ist schon mehr als 100 Jahre bekannt (s. z. B. Walker, 1924). Eine bestimmte Phase in dieser Oszillation sind die El-Niño-Ereignisse; dies ist der Zeitpunkt, zu dem sich die warme Oberflächenschicht vom äquatorialen Westpazifik über die sonst durch ablandigen Passatwind vor der südamerikanischen Küste geschaffenen Gebiete kalten Aufstiegswassers schiebt, oder zu dem, etwas mehr auf die Physik des Systems bezogen, (Sonnen)-Energie, die sich im Ozean angesammelt hat, verstärkt in die atmosphärische Zirkulation eingespeist wird. Ich

konnte durch Anwendung der hier für die Monsuneffekte genutzten Technik der Darstellung in einem geeigneten Phasenraum bestätigen (Böhme, 1994a), daß die El-Niño-Ereignisse tatsächlich eine bestimmte Phase eines bisher praktisch permanenten quasiperiodischen Prozesses sind: Für die Durchführung entsprechender Ensembleuntersuchungen wurden die 6 El-Niño-Ereignisse 1963, 1965, 1969, 1972, 1976 und 1982 aus dem Zeitraum von 1960 bis 1984 genutzt. Als El-Niño-Jahr w wurde jeweils jenes Jahr des sich meist über zwei Jahre erstreckenden Ereignisses bezeichnet, in das der Dezember (der erste, wenn es zwei gewesen sind) fiel. In der Abb. 7 sind die Schwerpunkte der im schon eingeführten Phasenraum (der interanuellen Änderung der troposphärischen Nord- und Südhemisphärentemperatur) von dem Ensemble aufgespannten Flächen eingetragen.

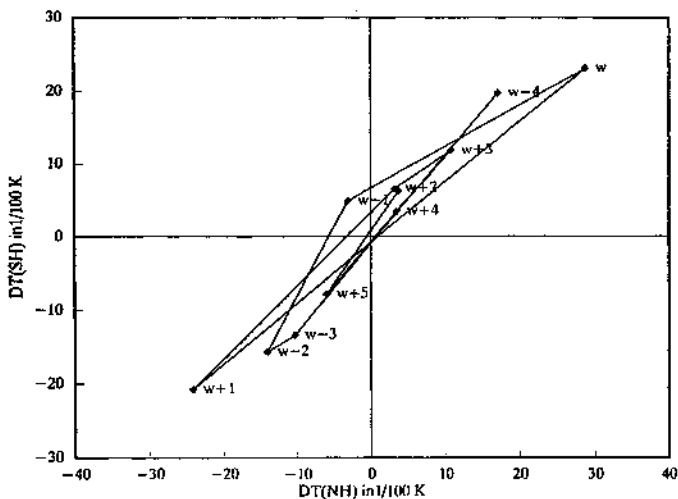


Abb. 7: Trajektorie des El-Niño-Ensemblemittels in der $DT(NH)$, $DT(SH)$ -Ebene für die Troposphärentemperatur (Böhme, 1994a).

Der Punkt w (rechts oben) gibt also die mittlere Änderung der Nordhemisphären- und der Südhemisphären-Temperatur der Troposphäre vom El-Niño-Jahr zum Folgejahr an. Man sieht, daß die beiden Hemisphären sich nach dem Maximum des Events erwärmen (und zwar um rund $1/4$ K). Die durchlaufenen Zustandspunkte liegen aber stets nahe der Diagonalen und kreisen nicht wie bei den Vulkanausbrüchen um den Nullpunkt. Eine

impulsartige Anfachung einer Antwort wie bei den Vulkanausbrüchen findet man ebenfalls nicht. Die Punkte $w-3$ und $w-2$ bedeuten Abkühlung in beiden Hemisphären. Der Verlauf der Größe der von dem Ensemble aufgespannte Phasenfläche (Abb. 8) zeigt nach dem Event nur ein schwaches sekundäres Minimum. Die stärkste Kontraktion der Ensemblezustände im Phasenraum findet man bei $w-3$ und $w-2$, d. h. bei den interannuellen Änderungen vom 3. zum 2. und vom 2. Vorjahr des Events zum unmittelbaren Vorjahr, bei denen also beide Hemisphären der Troposphäre sich abkühlten. Das kann man am einfachsten so deuten, daß eine Stimulierung der permanenten Fluktuation mit einer globalen Abkühlung der Troposphäre über einen Zeitraum von zwei Jahren vor dem El Niño Event einhergeht. Das sind offenbar die Zeiten, in denen Energie im Ozean gespeichert wird und damit der Troposphäre fehlt. Man kann auch sagen, daß das El Niño Event im Rahmen der SO verhindert, daß die Abkühlung der Troposphäre sich weiter fortsetzt.

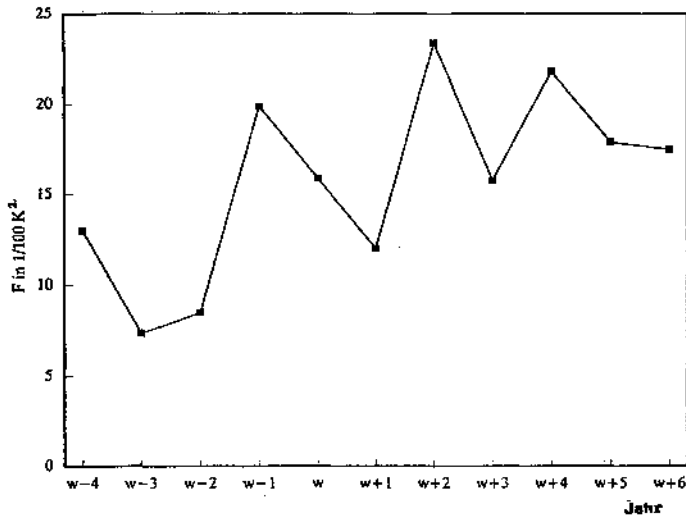


Abb. 8: Verlauf der Größe der vom El-Niño-Ensemble eingenommenen Fläche F in der Ebene der interannuellen Änderungen der NH- und SH-Temperaturen der Troposphäre ($DT(NH)$, $DT(SH)$) vom 3. Jahr vor dem El Niño Event bis zum 6. Jahr danach (Böhme, 1994a). Mit w ist das Jahr des El Niño Events bezeichnet (weitere Details im Text).

Bekanntlich (z. B. Jones, 1988) gibt es auch einen Einfluß der El-Niño-Ereignisse auf den CO₂-Haushalt der Atmosphäre. Bei detaillierteren Untersuchungen habe ich gefunden (Böhme, 1994b), daß die Maxima der Beseitigung von CO₂ aus der Atmosphäre etwa 1 Jahr nach der maximalen Erwärmung der beiden troposphärischen Hemisphären auftreten. Das spricht dafür, daß die Variationen der CO₂-Konzentration nicht im Sinne einer Verstärkung der inhärenten Oszillation des Klimasystems zu wirken scheinen, sondern daß sie eher als Reaktion auf die Temperaturänderungen zu verstehen sind.

(7) Auftreten von Symmetrieerscheinungen

In einem System, in dem verschiedene quasiperiodische Oszillationen vorhanden sind, können in Bezug auf bestimmte Zeitpunkte symmetrische Abläufe auftreten. Solche Systeme können also auch Moden haben, die normalerweise durch elliptische partielle Differentialgleichungen beschrieben werden. Das trifft auch auf die Atmosphäre zu (obwohl sie einem komplizierterem Dgl.-System gehorcht). Symmetrieerscheinungen im Ablauf der Luftdruckverteilung von Tag zu Tag über Zeiträume von mehreren Wochen und Monaten wurden schon in den 20er Jahren zweifelsfrei nachgewiesen (u. a. Weickmann, 1927). Ich habe vor etwa 15 Jahren darauf hingewiesen (Böhme, 1984), daß solche Symmetrien auch beim Verlauf der Monatsmitteltemperatur eines bestimmten Monats über die Jahre auftreten. Hier ein Beispiel aus der Gegenwart. Es betrifft den Februar. In der Abb. 9 ist mit dem ausgezogenen Linienzug der Ablauf der Abweichung der mitteleuropäischen Februarmitteltemperatur vom langjährigen Mittel zwischen 1986 und 1998 aufgetragen. Eine Spiegelung erfolgte zwischen 1993 und 1994. Die gespiegelten Werte sind noch einmal zurücklaufend aufgetragen, und zwar mit einem punktierten Linienzug. Die Spiegelung ist bisher fast perfekt. Spiegelungen treten relativ häufig, wenn auch meist nicht in so guter Qualität auf. Ein solches Verhalten deutet auf beträchtliches prognostisches Potential hin. Die unmittelbare Nutzung wird aber dadurch beschränkt und zu unsicher, daß unbekannt ist, wie lange die Symmetrie bestehen bleibt. Auswege sind bezüglich der Luftdrucksymmetrien in den 20er Jahren bisher nicht gefunden worden und auch ich habe bisher keine Anhaltspunkte für die

Gewinnung von prognostischen Aussagen über die Fortdauer der Symmetrien in den Monatsmitteltemperaturen finden können. Möglicherweise stoßen wir hier auf einem anderen Weg als normalerweise auf die durch deterministisches Chaos begrenzte Vorhersagbarkeit des Systems.

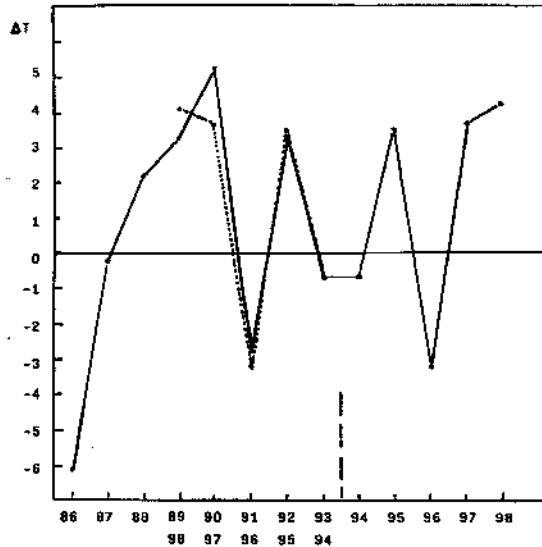


Abb. 9: Verlauf der Abweichungen der mitteleuropäischen Februartemperaturen ΔT vom langjährigen Mittel in den Jahren 1986 bis 1998 (durchgezogener Linienzug). Der punktierte Linienzug gibt den an 93,5 gespiegelten Verlauf der Jahre 1994 bis 1998 wieder.

(8) Bedeutung der statischen Stabilität als charakteristischer Parameter

Bekanntlich hängt das Verhalten eines nichtlinearen Systems (wie z.B. beim Lorenzsystem) wesentlich von kritischen Systemparametern ab. Bei der Atmosphäre spielt sicher die statische Stabilität eine Rolle. In den letzten Dezennien hat sich die Stabilität der Schichtung Troposphäre-Stratosphäre stark verändert und zwar vermindert (die Stratosphäre ist kälter geworden wahrscheinlich als ein Resultat der anwachsenden Konzentration des CO_2): In der Abb. 10 ist die Entwicklung der Anomalien der

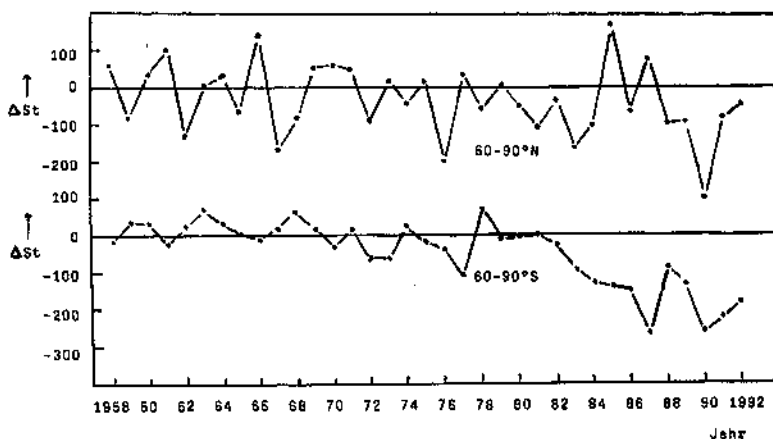


Abb. 10: Verlauf der Anomalien Δ der Stabilität St , also von $\Delta St = \Delta T(\text{Stratosphäre}) - \Delta T(\text{Troposphäre})$ in 60 bis 90°N bzw. °S, berechnet aus den Gebietsmittel von $\Delta T(300 \text{ bis } 100 \text{ hPa}) - \Delta T(850 \text{ bis } 300 \text{ hPa})$, die den in Angell (1994) veröffentlichten Daten entnommen sind.

Temperaturdifferenz zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre, also der Stabilität zwischen Strato- und Troposphäre, in den beiden Polargebieten dargestellt (die Anomalien sind bezogen auf den Mittelwert von 1958–75). Im Nordpolargebiet hat sich die Temperatur der Stratosphäre um etwa 2 K verringert. Etwa 50% der Änderung beziehen sich dabei auf die Zeit nach 1980. – Man erkennt: Während im langen Zeitscale, also über Jahrzehnte, der Verlauf der Stabilität in beiden Hemisphären ähnlich ist, ist das Verhalten von Jahr zu Jahr eher gegenläufig. Die genauere Auswertung zeigt, daß in 24 Fällen bei den 34 interannuellen Änderungen Gegenläufigkeit auftrat. Eine zeitliche Abnahme der Stabilität ($DST < 0$) in einem Polargebiet (Abb. 11a) tritt bei Abnahme der Temperatur ($DT < 0$) in der Stratosphäre auf, die (bei adiabatischen Verhältnissen) mit einem Aufsteigen der Luft in der Stratosphäre verbunden ist. Umgekehrt ist es bei Zunahme der Stabilität (hier am anderen Pol). Dies bedeutet, daß dem Vorzeichen nach unterschiedliche Änderung der Stabilität an den beiden Polen letztlich zu einer den Äquator überschreitenden Komponente der atmosphärischen Zirkulation führt.

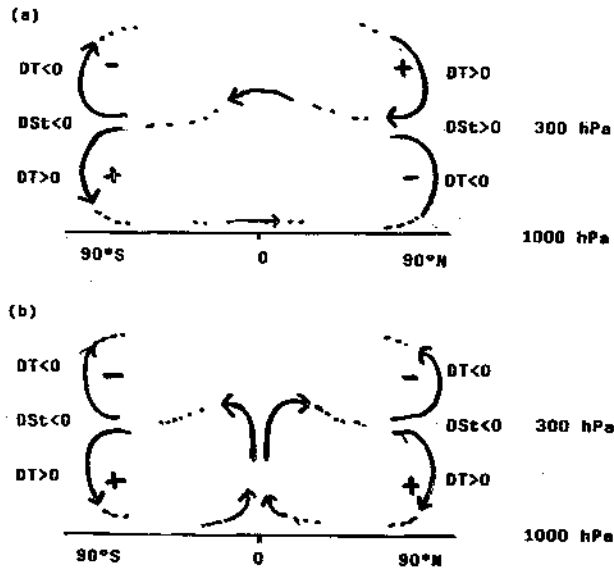


Abb. 11: Skizze eines wahrscheinlichen (zusätzlichen) großräumlichen Modes der Allgemeinen Zirkulation im Falle von
 (a) gleichzeitiger Zunahme der Stabilität $DSt > 0$ im Nordpolargebiet und Abnahme $DSt < 0$ im Südpolargebiet,
 (b) gleichzeitiger Abnahme $DSt < 0$ in beiden Polargebieten.

Nur in 10 Fällen von den 34 Paaren ist Gleichlauf vorhanden, in 6 Fällen in beiden Polargebieten Labilisierung, in 4 Fällen Stabilisierung. Die 6 generellen Labilisierungsfälle betreffen die interannuellen Änderungen 1964/65, 71/72, 75/76, 82/83 und 85/1986; das sind in allen Fällen Jahre mit einem El Niño Event. Genauer: Die gleichlaufende Labilisierung in den Polargebieten vom Jahr i zum Jahr $i + 1$ ist verbunden mit dem Beginn (oder der wesentlichen Verstärkung) eines El Niño Events in der 2. Hälfte des Jahres i . Die zusätzliche Strömung kann man sich (aus Gründen der Kontinuität folgt dies) so vorstellen wie in Abb. 11b, insbesondere zusätzliches Aufsteigen von Luft in der tropischen Troposphäre. Das folgt andererseits auch aus den Vorstellungen der Auswirkungen der El Niño Events, was das Vertrauen zur Aussagekraft dieser Skizzen verstärkt.

Allgemeiner kann man das Ergebnis als Hinweis darauf werten, daß das

Verhalten der statischen Stabilität ein gutes Maß (ein guter Parameter oder Indikator) für unterschiedliche Moden der allgemeinen Zirkulation sein dürfte.

4. Noch vorhandenes Vorhersagepotential?

Sicher ist für die übliche detaillierte Wettervorhersage die Vorhersagbarkeit beschränkt; es scheint so, daß die Grenze im Durchschnitt bei 10 bis 14 Tagen liegt. Vielleicht sind für diesen Scale (also einige Wochen) noch Fortschritte durch einen ausgefeilten Einsatz der sogenannten Ensembletechnik in der numerischen Wettervorhersage (s. z. B. Ehrendorfer, 1997) möglich, bei der die Vorhersage mit einer großen Zahl leicht variiertes Anfangsbedingungen sozusagen parallel durchgeführt wird. Im Endeffekt läuft die Ermittlung einer definitiven Vorhersage aus den, sagen wir, 50 Vorhersagen des Ensembles darauf hinaus, eine Kombination von numerischem mit statistischem Herangehen vorzunehmen. Trotz großer, von verschiedenen Vorhersagezentren unternommener Anstrengungen sind die Fortschritte eher noch bescheiden zu nennen (Balzer 1997, Ehrendorfer 1997), z. B. liegt die Phasenraumtrajektorie der wirklichen Wetterentwicklung zu oft noch außerhalb des Bereiches der Entwicklung des gesamten Ensembles, d. h. das numerische Modell ist nicht in der Lage, im Rahmen des Ensembles eine einzige Lösung anzubieten, die der wirklichen entspricht. Dann ist natürlich auch mit den raffiniertesten statistischen Verfahren nichts mehr zu machen. K. Balzer, seit langem mit Fragen der Prognoseprüfung befaßt, und jetzt mit dieser Aufgabe im Deutschen Wetterdienst beschäftigt, hat auf eine schon im Meteorologischen Dienst der DDR genutztes Herangehen zurückgegriffen, in dem er die Ensemble aus von verschiedenen Modellen gelieferten Vorhersagen bildet (Balzer und Emmrich, 1995). Damit werden deutlich bessere Ergebnisse erzielt. Das war eigentlich auch zu erwarten. So etwas ist natürlich im nachhinein leicht zu sagen. Aber es hängt damit zusammen, daß, kurz gesagt, die Modelle alle verschiedene Attraktoren haben, die prinzipiell durchweg nicht völlig mit dem Attraktor des natürlichen Systems übereinstimmen. Sie sind nur verschiedene Näherungen an das natürliche System, von denen jeweils eine andere die am meisten geeignete Näherung bei sich ändern-

dem Zustand der Atmosphäre sein kann. Wenn man dies beachtet, besteht hier mehr Hoffnung mit geeignetem statistischen Herangehen die günstigsten Lösungen zu erwischen.

Für die längeren Zeitscales, für Monate, Jahreszeiten, Jahre bis hin zu klimarelevanten Scales gibt es wahrscheinlich trotz der Limitierung der Vorhersagbarkeit im Scale bis zu wenigen Wochen noch weiteres Vorhersagepotential. In meinen Ausführungen habe ich dazu schon manches erwähnt.

Ein Fundus für weiterreichendes Vorhersagepotential besteht in der im atmosphärischen System sehr ausgeprägten Eigenschaft zur Selbstorganisation; mit Hoch- und Tiefdruckgebieten, mit den großen Zirkulationszentren wie dem Azorenhoch oder dem Monsunsystem werden in gewisser Näherung Individuen geschaffen, die in bestimmten Sinne ein Eigenleben führen, zu dem man Aussagen machen kann, wenn sie erst einmal geboren sind.

Vorhersagepotential für längere Zeitscales ist also möglicherweise erschließbar aus

- der Selbstorganisation von langlebiger Struktur
- der (unerwartet) langen Existenz von Verhaltensformen der Atmosphäre, die durch externe Störungen (Vulkaneruptionen, auch Erscheinungen der Sonnenaktivität) und innere markante Ereignisse angeregt werden
- dem vertieftem Studium quasiperiodischer Zustandabläufe, einschließlich Symmetrieerscheinungen
- der Ausnutzung vorhandener Regelmäßigkeiten von stückweiser Quasiperiodizität
- einer für das diagnostische Studium modifizierten Ensembletechnik, bei der u. a. ähnlich wie im Falle des Vulkaneinflusses unter Ausnutzung von Computern nach Kontraktionsstellen (oder bedingten Attraktoren) im Phasenraum (auch in höherdimensionalen) gesucht wird.

Ebeling (1994) hat hier, vor der Sozietät, einmal betont: Im Gebiet des Übergangs zum (vollen) Chaos <das ist auch das Gebiet, wo Selbstorganisation wirkt> „liegt eine Klasse von Prozessen mit beschränkter Vorhersagbarkeit, die ein langes Gedächtnis und historisches Verhalten zeigen... Die Erforschung der Geschichte dieser Prozesse verbessert die

Prognosechancen. Dieser Fall ist typisch für reale komplexe Prozesse“. – In der Meteorologie (und Klimatologie) ist es schon längere Zeit bekannt (z. B. Schmauß, 1945, Kluge, 1991), daß die Berücksichtigung der Vorgeschichte (anstelle von oder zusätzlich zu Anfangswerten) sich günstig auf die Vorhersageleistung auswirken kann, und zwar sowohl bei dynamisch-numerischen wie bei statistischen Vorhersageverfahren. Das Potential ist aber bei weitem noch nicht voll ausgelotet und genutzt.

5. Beispiel der Nutzung des Potentials für die Vorhersage im Monats- und Jahresbereich

Es ist wesentlich, gerade auch im Falle chaotisch deterministischer Systeme (deren Zustandstrajektorien sehr weit auseinanderlaufen können) und wenn man mit statistischen Methoden vorgeht, sehr viele Mitglieder im Ensemble zu haben, damit möglichst die wahre Lösung mit erfaßt wird, d. h. analoge Situationen unter möglichst vielen Bedingungen zu benutzen. Damit vermeidet man weitgehend, daß man durch einen Zufall auf ein (kleines) Ensemble gerät, das dann eine Entwicklung, die der Wirklichkeit entspricht, gar nicht mehr enthält, also analog dem Fall, auf den man bei der Anwendung nur eines einzigen numerischen Vorhersagemodells gar nicht so selten trifft. Bei statistischem Herangehen kann man bekanntlich in der Regel auch gar nicht auf einmal alle etwa infrage kommenden Bedingungen bei der Analogiesuche benutzen, also sehr hohe Forderungen an die Analoga stellen, da man bei den begrenzten Datenzeitreihen dann keine Analoga mehr findet. Man muß also für viele unterschiedliche Bedingungskombinationen die Analoga suchen. Sehr wichtig ist es, bei der Auswahl der verschiedenen Bedingungen das Prinzip der Historizität (d. h. die Vorgeschichte) zu beachten. Ich habe, zunächst nur als ein Beispiel, Analoga ausgewählt, die auf den mitteleuropäischen Monats temperaturabweichungen in verschiedenen Vormonaten aufbauen, z. B. von jeweils 5 Vormonaten, 4 kompakt beieinander, um relativ kurze Perioden zu erfassen, einer aus der weiter vorangehenden Zeit, z. B. aus weiteren 9 Monaten. Man hat dann für jeden Vorhersagemonat 9 unterschiedliche Bedingungskomplexe. Dies kann z. B. für weitere 14 voran-

gehende Ausgangsmonate durchgeführt werden. Dann hat man 135 unterschiedliche Bedingungskomplexe. Es werden aber nur solche Jahre als Analoga verwendet, bei denen das Kollektiv der Jahre aus einem Bedingungskomplex eine deutlich bevorzugte Aussage hinsichtlich der Frage zu warm bzw. zu kalt gibt (2 Klassen) und es werden dann alle diese Jahre als Analoga verwendet. Die Anzahl der Analoga, die auf bestimmte a priori gleichwahrscheinliche Klassen der Abweichungen fallen (in Praxis wurden Sextile benutzt) geben, wie sich zeigt und wie noch nachgewiesen wird, gute Anhaltspunkte für die Vorhersagen.

Tabelle 1: Verteilung der Analogien über die 6 Abweichungsklassen für verschiedene Vormonatskomplexe für Januar 1998. n gibt den n-ten Vormonat als 1. Monat einer Vierergruppe von Vormonaten an. Im konkreten Fall besteht bei n = 2 die „Vierergruppe“ aus den Monaten November 97 bis August 97.

n	SK	K	(K)	(W)	W	SW	Summe
15		6	3	2			11
14		<u>2</u>	1	1			4
13	2	<u>2</u>	2				6
12	1	—	2			1	4
9			<u>2</u>	4	2	4	12
8		7	7			<u>4</u>	18
7		3	7			11	21
6		3	6			<u>12</u>	21
2		2	2			4	8
1		4	4			<u>9</u>	17
Sum:	3	29	36	7	2	45	122
8-1		19	26			<u>40</u>	85

Die Verteilung für den Januar 1998 ist in der Tabelle 1 dargestellt (mit SK = sehr kalt, K = kalt, (K) = etwas zu kalt, (W) = etwas zu warm, W und SW sind die 6 Klassen für die Quantile gekennzeichnet). Von den 15 prinzipiell infragekommenden Ausgangsmonaten hatten nur Dezember 97 (n = 1), November 97 (n = 2), Juli 97 (n = 6), weiter n von 7 bis 9 und 12 bis 14 und Oktober 96 (n = 15) Analoga geliefert. Die größten Häufigkeiten ließen einen sehr warmen Januar erwarten. Wenn man die

Verteilungen im Detail betrachtet, sieht man, daß zum Endergebnis der Gesamtsumme (Zeile Sum) nur $n = 1$ bis $n = 7$ beigetragen haben (genauer 7, 6, 2, und 1). $n = 15$ bis 12 verwiesen sogar auf einen zu kalten Januar. Grundsätzlich, auch an vielen anderen Beispielen, ergab sich, daß es im allgemeinen nur sinnvoll ist, bis $n = 8$ zurückzugehen, das heißt, der Ausgangsmonat sollte nur bis zum 8. Vormonat genommen werden und der zu ihm gehörende Viererkomplex erstreckt sich dann bis zum 11. Vormonat, was aus geophysikalischen und astronomischen Gründen vernünftig erscheint und dafür spricht, daß sich Modulationen im Jahresgang meist nicht länger als ein Jahr erhalten. Implizit steckt in diesem Vorgehen die Voraussetzung, daß die Jahre (Monate der Jahre), die wirklich analog sind, bei verschiedenen Bedingungskomplexen vorkommen, so daß die am häufigsten vorkommenden auch die wahrscheinlichsten für die Vorhersage sind. Das muß sich an der Praxis zeigen.

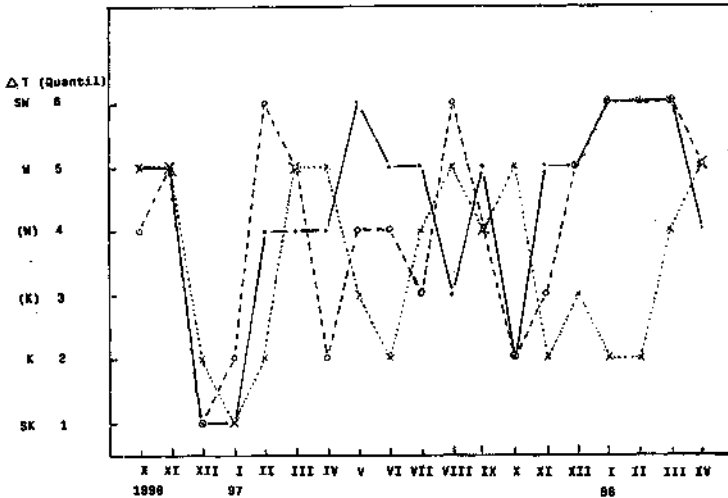


Abb. 12: Monatsvorhersage der mitteleuropäischen Temperaturabweichung (durchlaufender Linienzug) mit Hilfe einer Art statistischer Ensemblevorhersage bei Angabe der Temperaturabweichungen in 6 Quantilen (1 = SK = sehr kalt, 2 = K = kalt, 3 = (K) = etwas zu kalt, 4 = (W) = etwas zu warm, 5 W = warm, 6 = SW = sehr warm) im Vergleich mit den eingetretenen Abweichungen (unterbrochener Linienzug) und mit einer Vorhersage (punktierter Linienzug) von Malberg und Dettmann (Malberg und Kuglin, 1992; Dettmann und Malberg 1996/1998).

Ich habe in diesem Sinne mit den Monatstemperaturabweichungen in Mitteleuropa (u. a. Baur, 1962) gearbeitet. Das Ergebnis zeigt die Abb. 12. Mit der ausgezogenen Linie sind hier zunächst die Vorhersagen der mitteleuropäischen Temperaturabweichung in der Sextilklasseneinteilung für den Zeitraum vom Oktober 96 bis April 98 zu sehen. Dazu wurde einfach das jeweilige Maximum der Häufigkeitsverteilung über $n = 8 \dots 1$ genutzt. Die unterbrochene Linie gibt die aufgetretenen Verhältnisse wieder (u. a. also den extrem warmen Zeitraum von Januar bis März 98). Der Vergleich beider Linien zeigt, daß das Maximum in diesen Verteilungen (vor allem in der Zeit von September bis März) sehr gut für die Vorhersage im Rahmen von 6 Temperaturabweichungsklassen geeignet ist. Detailliertere Betrachtungen ergeben, daß ein Optimum bei der Vorhersage erreicht wird, wenn man die kompakten 4 Vormonate für die Auswahl der Analoga bis zum 11 Monat vor dem Vorhersagemonat benutzt (das entspricht $n = 8$); wenn man weiter zurückgeht, wird die Aussagegüte allmählich schlechter. Im Sommerhalbjahr funktioniert es nicht so gut, hier muß man wahrscheinlich bei der Auswahl der Bedingungskomplexe anders vorgehen. Die punktierte Linie in der Abb. 12 entspricht (auf die Sextileinteilung transformierten) Vorhersagen des Meteorologischen Instituts der Freien Universität Berlin (Malberg und Kuglin, 1996, Dettmann und Malberg, 1996/1998). Sie hatten die Monate des Winters 1997/98 zu kalt vorhergesagt. Den sehr warmen August 97, der sich nach der hier vorgestellten Methode überhaupt nicht ergab, hatten sie gut erfaßt.

Für eine exaktere Abschätzung der Güte der Vorhersage wurden die Vorhersagen als richtig gewertet, wenn die Abweichung 0 oder 1 Klasse betrug. Da die Klassen wegen der Quantileigenschaft im langjährigen Mittel gleich besetzt sind (so sind gerade die Quantile, hier Sextile definiert) müßten beim Wirken des Zufalls bei den 18 Vorhersagen von Oktober 96 bis März 98 allein 8 richtig sein, 12 Treffer wurden aber erzielt. Gemäß dem t-Test, der hier auf die Mittelwerte der Differenzen der Häufigkeiten angewandt wurde, hat die Aussage, daß es sich bei den 12 Treffern nicht um Zufall handelt, eine Sicherheit knapp über 90%. Das ist noch nicht allzu aussagekräftig. Bei den Vorhersagen zwischen September und März, das sind insgesamt 13, sind durch den Zufall 5 bis 6 Treffer zu erwarten, 11 Treffer konnten aber festgestellt werden. Das ergibt eine statistische Sicherheit von weit über 99%, daß es sich nicht um einen Zufall handelt,

sondern daß es eine Leistung der Prognosemethode ist. Im übrigen war die Erhaltungsneigung von Monat zu Monat sehr gering. Die effektive Zahl der Fälle wird dadurch um ca. 18% verringert. Das wurde bei der Berechnung der statistischen Signifikanz bzw. der Sicherheit der Aussage berücksichtigt – Mögliche Gründe für das abweichende Verhalten vom April 97–Aug. 97 könnte der Beginn eines sehr kräftigen El-Niño-Ereignisses im 1. Halbjahr 1997 gewesen sein oder auch die anderen Ausbreitungsbedingungen für lange Wellen in der Stratosphäre im Sommer gegenüber den Verhältnissen im Winter. Um dies zu klären, muß noch eine längere Zeitreihe bearbeitet werden. Das ist bei der Vielzahl der zu verarbeitenden Bedingungskomplexe ziemlich aufwendig, dürfte aber an Hand des aktuellen Materials bis zum Ende des Jahres 98 schon klarer sein.

Tabelle 2: Verteilung der Analogien über die 6 Abweichungsklassen für die verschiedenen Vormonatskomplexe

für März 1998							
n	SK	K	(K)	(W)	W	SW	Summe
14		1	1	1	<u>2</u>	1	6
11			2	2		4	8
10			8	2	2	7	19
9			1	1	1		3
8				<u>2</u>	1		3
7					2	4	6
3			1			<u>3</u>	4
2		8	10	8	6	<u>24</u>	56
1		16	5	11	5	<u>48</u>	85
Sum:		25	28	27	19	91	190
8-1		24	16	21	14	<u>79</u>	154
und für August 1997							
15	1	2	2	<u>7</u>	1		13
14	2		1			1	4
13	<u>3</u>	2	1	1			7
12	<u>2</u>		1	2	1	4	10
11	1				1	<u>2</u>	4
10			4	<u>12</u>	3	5	24
7	<u>8</u>		4	<u>3</u>	1		16
4			1	1	1	1	4
3		2	1	4	4	2	13
1	5	14	<u>15</u>				34
Sum:	22	20	30	30	12	15	129
8-1	13	16	<u>21</u>	8	8	3	67

Betrachten wir noch die Verteilung der Analoga für einige interessante Vorhersagemonate: In der Tabelle 2 sind die Verhältnisse für den (gegenwärtigen) Monat März 98 und den August 97 dargestellt. Auch beim März 98 ergaben sich die gebündelten Hinweise für einen zu warmen März von $n = 7$ an (also mit dem August als Ausgangsmonat). Für den August 97, der sehr warm ausfiel, ergaben sich keine tragfähigen Hinweise, eher für einen etwas zu kalten August, aber diese Aussage hätte letztlich nur auf dem Bedingungskomplex $n = 1$ (also vom Juli 97 mit dem Viererkomplex bis April 97) beruht.

Tabelle 3: Verteilung der Analogien über die 6 Abweichungsklassen für die verschiedenen Vormonatskomplexe

für April 1998							
n	SK	K	(K)	(W)	W	SW	Summe
15			1	2	2	2	7
12			1	3			4
11			2	4	7		13
10				2	1		3
9	3	4	10	3			20
5					14		23
4				8	10	2	20
3	2	6		21	7	2	38
2		10	6	53	9	7	85
1	3	4	2	14	7	7	37
Sum:	8	24	22	119	57	20	250
8-1	5	20	8	105	47	18	203

Die Daten für April 98 (Tabelle 3) deuten darauf hin, daß er vorrangig etwas zu warm bis zu warm ausfallen sollte. Das ist nun schon ein Signal, das ununterbrochen seit dem 5. Vormonat (also seit November 97) besteht und seit Februar 98 sehr deutlich geworden ist. Man sollte aber vorsichtig sein, da wir möglicherweise wieder in den Bereich der ungünstigen Monate der warmen Jahreszeit kommen (Anmerkung vom 21.5.98: Die mitteleuropäische Monatsmitteltemperatur hatte eine Abweichung von ca. 1.0 K und gehört demnach in die Klasse W. Die Vorhersage ist also wiederum als zutreffend zu werten).

Insgesamt kann man auch feststellen, daß die oben erwähnte implizite Voraussetzung, daß die in der Vorhersageprozedur am häufigsten auftretenden Analoga auch die wahrscheinlichsten sind, mit hoher Sicherheit zu-

treffend ist. Dafür spricht auch, daß allein dasjenige Jahr, das bei der Vorhersageprozedur insgesamt am häufigsten als Analogie bei den verschiedenen Bedingungs-komplexen für den betreffenden Vorhersagemonat auftritt, bereits eine gute Vorhersage liefert!

6. Schlußfolgerungen

(1) Viele Anzeichen weisen darauf hin, daß die Atmosphäre mit ihrer Zirkulation und das Klimasystem sich deterministisch chaotisch verhalten.

(2) Der Übergang zum Zustands- bzw. Phasenraum beim Studium der Eigenschaften komplexer nichtlinearer Systeme bewährt sich. Der zweckmäßigen Auswahl der Phasenkoordinaten kommt dabei wesentlich Bedeutung zu. Einem Vorschlag von H. Fortak folgend dürfte es dabei günstig sein, als Phasenkoordinaten adiabatische Invarianten zu nehmen, wie zum Beispiel die potentielle Temperatur oder die potentielle Vorticity (die Ertelsche Wirbelgröße).

(3) Eine zusammenfassende Wertung, die das Vorhersagepotential betrifft, habe ich schon unter 3. gegeben und im gewissen Sinne auch unter 4. durch die praktische Anwendung einer verallgemeinerten Ensembletechnik auf statistische Vorhersagen, hier auf Monatsvorhersagen, vorgenommen. Sicher ist, daß noch erhebliches Vorhersagepotential erschließbar ist.

(4) Hinsichtlich des Klimasystem möchte ich nur noch bekräftigen, was K. Bernhardt und ich bei unserem Vortrag 1993 hervorgehoben hatten (dort S.74):

„1. Die Aufdeckung und Nutzung... spezieller <bedingter> Attraktoren des Klimasystems (wie die im Zusammenhang mit Vulkanausbrüchen aktivierten) könnte bei der Vorhersage des zukünftigen Verhaltens unseres Klimasystems voranhelfen. Bei der diagnostischen Untersuchung von Zeitreihen ... kommt es dabei auf eine optimale Auswahl der... Zustandskoordinaten an, so daß sich die ausgewählten niedrigerdimensionalen Phasenräume ... dem vermuteten höherdimensionalen Attraktor im Phasenraum möglichst gut anpassen,

2. Im realen Klimasystem sind die globalen Fluktuationen sehr wahrscheinlich enger mit den regionalen... verknüpft, als es die <ziemlich stark divergierenden> bisherigen Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle vermuten lassen; das bedeutet auch, daß die unterschiedlichen Annahmen und Vernachlässigungen in den Modellen einen wesentlichen Teil der Streuung der Resultate <bei den regionalen Fluktuationen> verursacht haben dürften.“

(5) Zur Relation „Modelle“ und „Wirklichkeit“ hebe ich hervor:

Alle Modelle enthalten Vereinfachungen und Vernachlässigungen (auch viele recht wirksame physikalische und chemische Vorgänge können bisher nur sehr vereinfacht beschrieben und/oder in den Modellen berücksichtigt werden). – Jedes Modell hat seinen eigenen Attraktor. Man kann durch numerische Experimente zwar (auch im vergleichenden Sinne) die Eigenschaften der Modelle erkunden; dies sind aber Aussagen, die wegen der blättrigen, fraktalen Struktur der Attraktoren nur mit großer Vorsicht auf die Wirklichkeit und ihren Attraktor übertragen werden können. Das Problem ist es, die richtige Lösungsfläche zu treffen (hierzu auch Schönwiese, 1996 S. 59/60).

Grundsätzlich hilft nur, den Attraktor der Natur (d. h., denjenigen, der in Wirklichkeit wirkt) kennenzulernen. Bisher gibt es im Weltklimaprogramm keine Aktivitäten, die in diesem Sinne spezifisch auf Untersuchungen zur Dynamik nichtlinearer Systeme orientiert sind. In den bestehenden Gruppen zu numerischen Experimenten müßten hierzu (insbesondere auch zur diagnostischen Seite) gesonderte Aktivitäten geschaffen werden. Ansatzpunkte dazu sind vielleicht jetzt gegeben. Im Heft No. 1 des Jahrganges 1997 des Newsletter des CLIVAR (CLIVAR heißt „Klimavariabilität- und Vorhersagbarkeitsprogramm“ und ist ein sehr wichtiger Teil des Weltklimaforschungsprogramms) heißt es „Hence it will be essential for CLIVAR to maintain also healthy integrating programmes of global modelling and global scale empirical, analytical and diagnostic studies“.

(6) Sicherung der Beobachtungen: Modelle müssen grundsätzlich an der Wirklichkeit überprüft werden, d. h. es muß alles getan werden, die vorhandenen Daten zu sichern, die Beobachtungen fortzuführen und zu

erweitern auch unter Berücksichtigung der Erfordernisse der Modelle, dabei aber insbesondere die schon vorhandenen langen Reihen möglichst homogen fortzusetzen. Die überall in der Welt zunehmende Tendenz, im Sinne einer falsch verstandenen Sparsamkeit die langen Reihen abzubrechen oder die Stationen zu ändern, ist für ein besseres Verständnis des Systems der allgemeinen Zirkulation und des Klimasystems in hohem Grade abträglich. Man darf im übrigen nicht annehmen, daß der (durchaus aufwendige und sonst auch nützliche) Einsatz numerischer Experimente einen (vollwertigen) Ausweg darstellt und man an die Behandlung von Beobachtungen und Beobachtungsreihen nicht mehr so strenge Maßstäbe legen muß.

Literatur

- Angell, J. K., 1994: Global, hemispheric and zonal temperature anomalies derived from radiosonde records. S. 636–672. In Boden, T. A., D. P. Kaiser, R. J. Sepanski, F. W. Stoss (Eds.): Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. ORNL/CDIAC-65 Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, USA.
- Balzer, K., Emmrich, P., 1995: Gratis two-model-ensemble versus EPS. Proceedings Fifth Workshop on Meteorological Operational Systems, ECMWF Reading Nov. 1995.
- Balzer, K., 1997: Good forecast, bad forecast; can we know it before? Third European Conference on Application of Meteorology Lindau Sept. 1997. *Annalen der Meteorologie* Bd. 35, 29–31.
- Baur, F., 1962 u. ff.: Abweichungen der Monatsmittel der Temperatur Mitteleuropas. U. a. in Linke, F., 1962: *Meteorologisches Taschenbuch Neue Ausgabe I*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, Leipzig, 740–745.
- Berhardt, K., Böhme, W., 1994: Klima und Menschheit. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät*, H. 1/2 (1994), 51–90.
- Böhme, W., 1984: Über einige Eigenschaften der Atmosphäre und die Bedeutung für ihre Dynamik. *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik* Nr. 133 (Bd. XVIII), 33–34.
- Böhme, W., 1993: Untersuchungen zur Reaktion des Klimasystems auf große vulkanische Eruptionen mittels Phasenebenen-Darstellung. *Meteorol. Zeitschrift* N. F. 2, 76–80.
- Böhme, W., 1994a: Comparison study of the response of the climate system to major volcanic eruptions and El Niño events. In: Grasman, J., G. van Straten (Eds.): *Predictability and nonlinear modelling in natural sciences and economics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 65–85.
- Böhme, W., 1994b: Diagnostische Untersuchungen über den Zusammenhang von globalen und regionalen Klimavariationen unter Anwendung von Darstellungen im Phasenraum. *PIK Reports* No. 1: 3. Deutsche Klimatagung Potsdam 11.–14. April 1994 Tagungsband, 15–19.

- Böhme, W., 1995: Use of properties of non-linear system dynamics for derivation of regional climate behaviour. In: Third International Conference on Modelling of Global Climate Change and Variability 4–8 September 1995 Hamburg, Max-Planck-Institut für Meteorologie; Abstracts 170.
- Dettmann, R., Malberg, H., 1996/1998: Temperaturprognosen für Berlin (für jeweils drei Monate). Beilage zur Berliner Wetterkarte TP 10/97 (2.10.96) bis TP 4/98 (3.4.98).
- Ebeling, W., 1994: Entropie, Vorhersagbarkeit und nichtlineare Dynamik. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, H. 1/2 (1994), 33–50.
- Ehrendorfer, M., 1997: Predicting the uncertainty of numerical weather forecasts: a review. Meteorol. Zeitschrift N. F. 6, 147–183.
- Fraedrich, K., 1996: Das Lorenz-Modell: Ein Paradigma für Wetter und Vorhersagbarkeit. *promet* 25, 62–79.
- Gassmann, F., 1991: Chaos und Ordnung in natürlichen Systemen. In K. Hutter (Ed.): Dynamik umweltrelevanter Systeme. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 369–420.
- Jones, P. D., 1988: The influence of ENSO on global temperatures. *Climate Monitor* 17, 80–89.
- Klüge, J., 1991: Die Bjerknes'sche und Schmauß'sche Auffassung des Problems der Wettervorhersage aus heutiger Sicht. *Z. Meteorol.* 41, 65–75.
- Lanius, K., 1995: Die Erde im Wandel – Grenzen des Vorhersagbaren. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin Oxford.
- Lorenz, E., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atm. Sci.* 20, 130–141.
- Malberg, H., Kuglin, R., 1992: Prognose der Monatsmitteltemperaturen für Berlin. Beilage zur Berliner Wetterkarte 96/22 vom 8.10.1992.
- Schönwiese, Chr.-D., 1996: Der anthropogene Treibhauseffekt in Konkurrenz zu natürlichen Klimaänderungen. *promet* 25, 53–61.
- Schmauß, A., 1945: Das Problem der Wettervorhersage. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 5. Aufl., 138 S.
- Smith, L. A., 1995: Ensemble predictions and chaotic systems. 6th International Meeting on Statistical Climatology, 19–23 June, Galway, Ireland, 599–602.
- Walker, G. T., 1924: Correlation in seasonal variations of weather IX: A further study of world weather. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 24(9), 275–332.
- Weickmann, L., 1927: Das Wellenproblem der Atmosphäre. *Z. Meteorol.*, 241–253.
- Ziehmann-Schlumbohm, Chr., 1994: Vorhersagestudien in chaotischen Systemen und in der Praxis – Anwendung von Methoden der nichtlinearen Systemanalyse –. Freie Universität Berlin, Meteorologische Abhandlungen N. F., Serie A Band 8 Heft 3.