

WÜRZBURGER GEOGRAPHISCHE ARBEITEN

Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg

Herausgeber: D. Böhn – H. Hagedorn – H. Jäger – H.-G. Wagner

Schriftleiter: U. Glaser

Heft 87

Geowissenschaftliche Beiträge zu Forschung, Lehre und Praxis

Festschrift für Horst Hagedorn

Würzburg 1993

Im Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Würzburg
in Verbindung mit der Geographischen Gesellschaft Würzburg

Druck: Böhler-Verlag GmbH, Seilerstraße 10

Bezug: Institut für Geographie der Universität Würzburg
Am Hubland, D-Würzburg

© Alle Rechte vorbehalten
ISSN: 0510-9833

Würzburger Geographische Arbeiten	87	419-430	Würzburg	1993
-----------------------------------	----	---------	----------	------

Möglichkeiten und Probleme der Abschätzung zukünftiger Klimaänderungen

Jucundus JACOBET, Würzburg

Summary: First, the different ways of investigating future climate changes (simulation by numerical climate models; paleo-climatic analogies; transfer of empirical results from recent data) are addressed with reference to their advantages and limitations. Secondly, an example from the southern hemispheric tropics is presented based on a statistical evaluation of upper tropospheric model output after 90-100 years of continuously increasing greenhouse gas emissions, indicating more frequent disruptions of the monsoonal circulation during high summer. Finally, different types of systems are illustrated using a Lorenz equation pointing out their relevance to future climatic changes.

Zusammenfassung: Zunächst werden die grundsätzlich möglichen Arbeitsweisen zur Abschätzung künftiger Klimaänderungen (Simulation mit numerischen Klimamodellen; Analogieschlüsse aus paläoklimatologischen Studien; Übertragung empirischer Zusammenhänge aus rezentem Datenmaterial) in ihren Vorteilen und Begrenztheiten kurz beleuchtet. Es folgt ein Beispiel aus den südhemisphärischen Tropen, das auf der Grundlage einer statistischen Auswertung von hochtroposphärischem Klimamodell-Output nach 90-100 Jahren ungebremst fortgesetzter Spurengasfreisetzung im Hochsommer eine häufigere Störung der Monsunzirkulation andeutet. Abschließend werden anhand einer Lorenz-Gleichung verschiedene Systemtypen illustriert, denen potentielle Bedeutung im Kontext von Klimaänderungen zukommt.

Seit sich Hinweise aus breitgefächerten Wissenschaftsdisziplinen verdichtet haben, daß der Mensch in zunehmendem Maße das Klima unseres Planeten beeinflusst und modifiziert, steigt auch das Interesse an Aussagen über die künftige Klimaentwicklung, sei es aus wissenschaftlicher Herausforderung oder im handlungsbezogenen Anspruch, geeignete Begrenzungs- oder Anpassungsstrategien zu entwerfen. Wie aber gelangt die heutige Klimaforschung zu Abschätzungen künftiger Entwicklungen, und welche Begrenzungs Momente in der prognostischen Aussage sind dabei zu berücksichtigen? Natürlich hängt dies ab von den jeweiligen Arbeitsweisen, die sich in folgende Hauptgruppen untergliedern lassen:

a) Simulation mit numerischen Klimamodellen;

- b) Analogieschlüsse aus paläoklimatologischen Studien;
- c) Übertragung empirischer Zusammenhänge aus rezentem Datenmaterial.

Blicken wir zunächst auf den Bereich numerischer Klimamodelle, über die mittlerweile eine Vielzahl von Simulationsberechnungen für Bedingungen eines anthropogen verstärkten Treibhauseffektes vorgelegt worden sind (vgl. SCHÖNWIESE 1991, S.33ff.). Der unbestreitbare Vorteil dieser Arbeitsweise liegt gerade darin, ein reales System über die mathematische Formulierung seiner physikalischen Prozesse modellhaft zu erfassen und so auch für geänderte oder sich ändernde Rahmenbedingungen in seiner Reaktion abschätzen zu können. Allerdings zeigen die teilweise nicht unerheblichen Ergebnisunterschiede zwischen verschiedenen Modellen, daß nach wie vor nur mehr oder weniger grobe Näherungen erreicht werden. Dafür sind im wesentlichen folgende Hauptursachen maßgeblich (HASSELMANN 1990):

- i) Realistische Klimamodelle haben nicht nur die Atmosphäre, sondern auch die weiteren Bestandteile des Klimasystems (Ozeane, Kryosphäre, Landoberfläche, Biosphäre) sowie zahlreiche biogeochemische Zyklen zu berücksichtigen, die die atmosphärische Konzentration klimawirksamer Spurengase kontrollieren. Liegt die Ankopplung von Ozeanmodellen an atmosphärische Zirkulationsmodelle erst wenige Jahre zurück, so steht die Entwicklung integrierbarer Modelle biogeochemischer Kreisläufe sogar erst im Erarbeitungsstadium.
- ii) Die charakteristischen Reaktionszeiten der einzelnen miteinander wechselwirkend verkoppelten Subsysteme sind derartig unterschiedlich (von wenigen Tagen oder Wochen bei der Atmosphäre bis zu hunderten oder gar tausenden Jahren bei Ozeanen oder Inlandeis), daß abschließende Modellabschätzungen zur Reaktion des Gesamtsystems bislang nicht möglich waren.
- iii) Einen erheblichen Unsicherheitsfaktor stellen die breiten- und höhenabhängigen Rückkoppelungen der Wolken dar; hier sind die Schwankungsbreiten zwischen verschiedenen Modellen teils sogar größer als das klimatologische Signal.
- iv) Schließlich liegt die horizontale Auflösung bisheriger globaler Modelle mit 500-1000 km so niedrig, daß insbesondere keine regional hinreichend differenzierten Aussagen getroffen werden können.

Genau die räumliche Vielfalt von Klimaänderungen sowie die spezifische Bedeutung der (modellhaft noch schwieriger erfassbaren) hygrischen Komponenten sind dagegen zentrale Gesichtspunkte bei der paläoklimatologischen Vorgehensweise, rekonstruierte Bedingungen vergangener Zeitabschnitte in aktualistischer Übertra-

gung auf zukünftige Perioden zu projizieren. Tatsächlich legitimiert die offensichtliche Tendenz der Atmosphäre, auf unterschiedlichen Zeitskalen immer wieder ähnliche Strömungskonfigurationen anzunehmen, auch derartige Analogieschlüsse, wobei die projizierten Bilder aus der Vergangenheit ja faktisch erwiesenermaßen realisierbare Zustandsformen widerspiegeln, die unter entsprechenden Bedingungen auch in der Zukunft angenommen werden können (vgl. HAGEDORN & GLASER 1990). Auf der anderen Seite werden gerade die Rahmenbedingungen während früherer und heutiger oder künftiger Zeitabschnitte meist zu unterschiedlich für eine prognostische Übertragung sein (HAGEDORN 1992, S. 88), und überdies sind auch bei Klimaänderungen gleichen Vorzeichens verschiedene Verursachungsmomente durchaus in Rechnung zu stellen, die abweichende Verlaufsformen oder Verteilungsstrukturen nach sich zu ziehen vermögen. So sollte man umfassenden Analogiebildungen mit großer Vorsicht begegnen, die beispielsweise so unterschiedliche Epochen wie das postglaziale, das letzte interglaziale und das pliozäne Klimaoptimum zunehmend fortgeschrittenen Stadien der aufgrund menschlicher Spurengasfreisetzung für das nächste Jahrhundert zu erwartenden globalen Erwärmung als vergleichbare Zustandsformen zuordnen (BUDYKO et al. 1990).

Stützt man sich stattdessen auf Datenmaterial aus rezenten oder jüngeren historischen Zeitabschnitten (z.B. GLASER 1991), sind keine fundamental andersartigen Rahmenbedingungen gegenüber der aktuellen Klimaentwicklung in Betracht zu ziehen. So lassen sich empirisch gewonnene Zusammenhänge zumindest begrenzt fortsetzen oder übertragen. Besonders zu erwähnen sind in diesem Kontext die multiplen Regressionsmodelle von SCHÖNWIESE & RUNGE (1991), die den rezenten Verlauf der bodennahen Lufttemperatur in Abhängigkeit von parametrisierten Einflußgrößen (Solaraktivität, Vulkantätigkeit, CO₂-Konzentration, El-Niño-Schwankung) approximieren und zu einer statistischen Abschätzung der (auch jahreszeitlich und regional auflösbaren) Temperaturänderung nach einer angenommenen CO₂-Verdoppelung herangezogen werden können.

Aber auch Anomaliestudien der atmosphärischen Zirkulation sind geeignet, Vorstellungen insbesondere über die räumliche Differenzierung bei künftigen Klimaänderungen zu entwickeln, da derartige Änderungen meist mit Umstellungen der Zirkulation einhergehen, deren Zielrichtung bereits im Inventar der heutigen Strömungskonfigurationen unter geeigneten Anomaliebedingungen aufgespürt werden kann. So läßt sich etwa für die winterliche Nordhemisphäre zeigen, daß ein bestimmtes Zirkulati-

onsmuster, das bei anomal niedrigen meridionalen Temperaturkontrasten in der unteren Troposphäre (wie sie bei einer globalen Erwärmung erwartet werden) verstärkt in Erscheinung tritt, eine Reihe regional unterschiedlicher Begleitphänomene der rezenten Erwärmung prozessual miteinander zu verbinden vermag und bereits in den vergangenen Jahrzehnten in den insgesamt beobachteten Strömungsfeldern zunehmend repräsentiert ist (JACOBET 1993). Der naheliegende Gedanke, in diesem Zirkulationsmuster ein Schaubild künftig bedeutsamer werdender Zustandsformen zu erblicken, führt zu regionalisierenden Aussagen über die Klimaentwicklung gemäß der räumlichen Anordnung der einzelnen Strömungssäte.

Allerdings gibt es keine nachweisbare Sicherheit, daß rezent abgeleitete Zusammenhänge auch für zukünftige Zeitabschnitte ihre Gültigkeit behalten, nicht einmal solange noch keine fundamentalen Änderungen der Rahmenbedingungen eintreten. Allgemeiner Hintergrund dafür ist die natürliche Klimavariabilität, die nicht nur teils von nicht-prognostizierbaren Einflußgrößen abhängt, sondern wahrscheinlich bis mindestens Anfang des nächsten Jahrhunderts anthropogene Klimasignale noch überdeckt.

Angesichts der Aussageeinschränkungen, die in unterschiedlicher Art allen Vorgehensweisen anhaften, wird man künftig verstärkt bemüht sein, mehrere Varianten in der Untersuchung miteinander zu verbinden. Beispiele dafür, die gerade auf eine differenziertere Regionalisierung abheben, sind etwa die Arbeiten von von STORCH et al. (1991) und von SEGGERN (1992), in denen zunächst für gegenwärtige Bedingungen großräumige Zirkulationsinformation über statistische Methoden mit räumlich höher aufgelösten regionalen Klimadaten verknüpft wird, um anschließend mittels dieser empirischen Beziehungen aus modellhaft simulierten Zirkulationsangaben für erhöhte Treibhausgaskonzentrationen auf räumlich differenzierte klimatische Auswirkungen zu schließen. Bei derartigen kombinierten Vorgehensweisen werden zwar die grundsätzlichen Unzulänglichkeiten der einzelnen Verfahren nicht ausgeschaltet, aber man gelangt doch zu erweiterten Aussagemöglichkeiten, etwa hinsichtlich einer verbesserten Regionalisierung globaler Klimaänderungen.

Als einfaches Beispiel einer Anwendung empirischer Methoden auf Klimamodellergebnisse sei ein Fall aus den südhemisphärischen Tropen zur Hochphase der Sommermonsunzeit (Januar/Februar) herangezogen. Die Datengrundlage bilden gitterförmige Höhenangaben des 300 hPa Geopotentials, wie sie vom atmosphärisch-

ozeanischen Hamburger Klimamodell für die letzten zehn Jahre einer hundertjährigen Vorausberechnung einmal für den Fall einer ungebremst steigenden Treibhausgasfreisetzung (IPCC-Szenario A, siehe HOUGHTON et al. 1990), zum anderen für konstant verbleibende Spurengaskonzentrationen (Kontrollfall) ausgegeben worden sind. Die zweifach täglichen hochtroposphärischen Modelldaten sind monatlich gemittelt und anschließend einer T-modalen Hauptkomponentenanalyse unterworfen worden, als deren Ergebnis insbesondere zwei geopotentielle Verteilungsmuster (Fig. 1) resultieren, die in den ursprünglichen Gitterfeldern von Kontrollfall und Szenario A unterschiedlich repräsentiert sind (Fig. 2): Während Verteilungsmuster 2 signifikant höhere Varianzerklärungsanteile im Kontrollfall erreicht, liegen diese bei Verteilungsmuster 1 entsprechend höher im Szenario-Kollektiv (1 % Irrtumswahrscheinlichkeit beim U-Test nach Mann/Whitney). Also macht sich im Hochsommer der südhemisphärischen Tropen nach 90-100 Jahren fortgesetzten Konzentrationsanstiegs klimawirksamer Spurengase eine andere Geopotentialverteilung stärker bemerkbar als bei etwa heutigen Verhältnissen.

Die interpolierten Verteilungsmuster aus Fig. 1 sind wegen des in Äquatornähe auslaufenden Gültigkeitsbereichs der geostrophischen Windapproximation zwar nicht durchgehend als Höhenströmungsfelder zu interpretieren, aber einige wesentliche zirkulationsbezogene Aussagen lassen sich dennoch ableiten. So erkennen wir bei Hauptkomponente 2, die - stark vereinfachend - einem heutigen Niveau des Treibhauseffektes primär zugeordnet sei, randtropische Hochdruckgebiete vor allem in den kontinentalen Bereichen und von dort äquatorwärts gerichtete Geopotentialabnahmen (außer in der Region des pazifischen transäquatorialen Zyklonenpaares, das häufig in Anti-El-Niño-Situationen zu beobachten ist). Diese generelle Druckverteilung erzeugt östliche Höhenströmungen und Massendivergenzen über den äußeren Tropen, wie sie für eine intakte Monsunzirkulation konstituierend sind. Unter den Bedingungen eines anthropogen signifikant verstärkten Treibhauseffektes zeichnet sich in der gewichtiger werdenden Hauptkomponente 1 dagegen eine deutliche äquatorwärtige Ausweitung der außertropischen Westdrift ab, die auch die anschließenden Geopotentialmaxima gleichsinnig verschiebt und so zu einer monsunbeeinträchtigenden Störung der östlichen Höhenströmung über den Tropen führt.

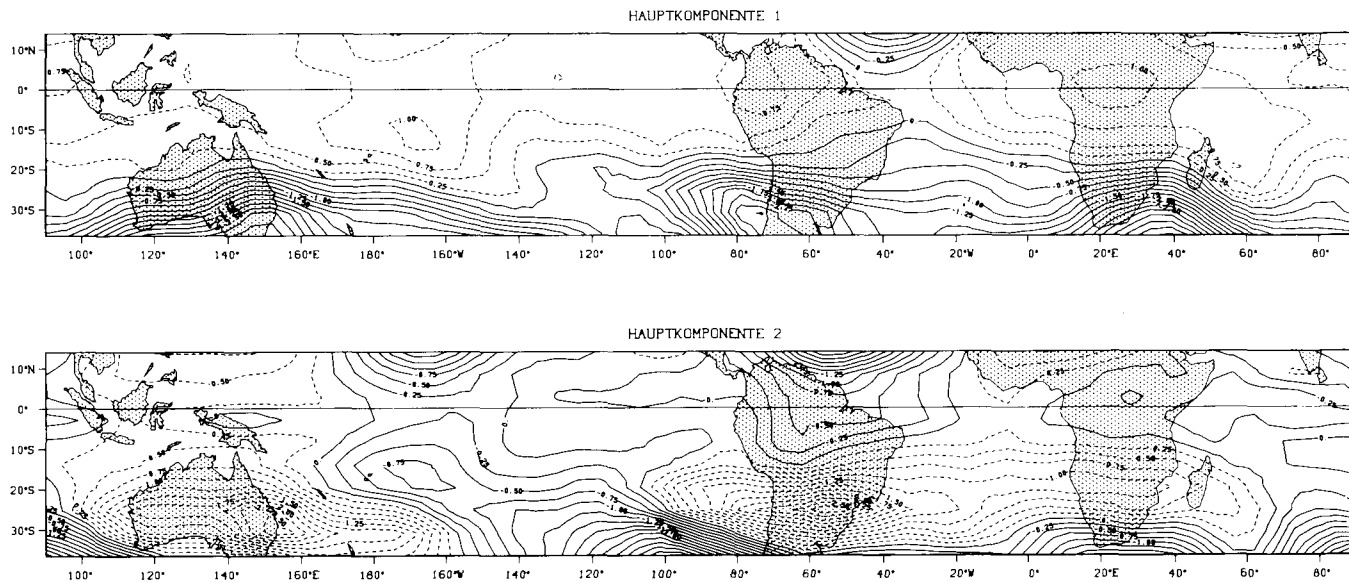


Fig.1: Standardisierte Werte (>0 gestrichelt) der ersten beiden Hauptkomponenten aus den monatsgemittelten tropischen 300 hPa Geopotentialfeldern von Januar und Februar der Hamburger Klimamodell-Jahre 91-100 für Kontrollfall und Szenario A.

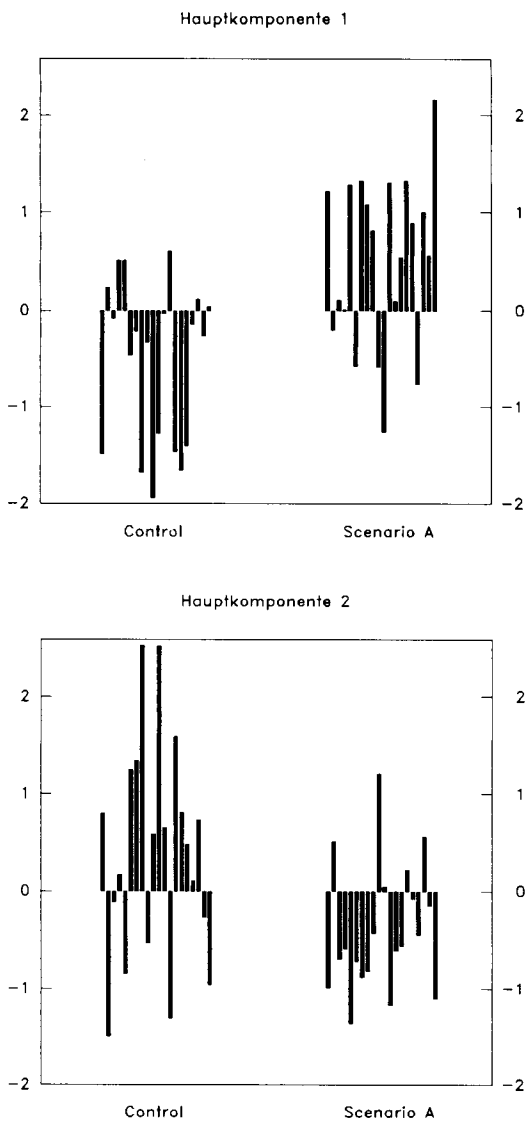


Fig.2: Standardisierte Varianzerklärungsanteile der ersten beiden Hauptkomponenten aus den monatsgemittelten tropischen 300 hPa Geopotentialfeldern von Januar und Februar der Hamburger Klimamodell-Jahre 91-100 für Kontrollfall und Szenario A.

Begründet ist diese Entwicklung in einer nachhaltigen Intensitätsverstärkung der außertropischen Westdrift, wie sie in der hochsignifikanten Zunahme des Meridionalgradienten troposphärischer Schichtdicken zwischen Subtropen und Subpolarbereich beim Vergleich Kontrollfall/Szenario A zum Ausdruck kommt (Fig. 3). Im Unterschied zu den bodennahen Verhältnissen (hier verringert sich der Temperaturkontrast zwischen niederen und höheren Breiten eher) wird in höheren Troposphärenschichten im Gefolge der erwärmungsbedingten Verdunstungszunahme vor allem über den Tropen verstärkt latente Energie freigesetzt und so das thermische Gefälle zu den höheren Breiten weiter verschärft (FLOHN 1989). Die mit der folglich Zirkulationsintensivierung einhergehende äquatorwärtige Ausweitung der außertropischen Westdrift muß aber zu einer häufigeren Störung des monsonalen Zirkulationssystems führen, wodurch zumindest Teile der semiariden Tropen (in ähnlicher Weise auch auf der Nordhemisphäre) nicht in den Genuß generell höherer Niederschläge bei vermehrtem precipitable water, sondern unter Bedingungen unsichereren Niederschlags bei gesteigerten Ergiebigkeitsschwankungen gelangen würden.

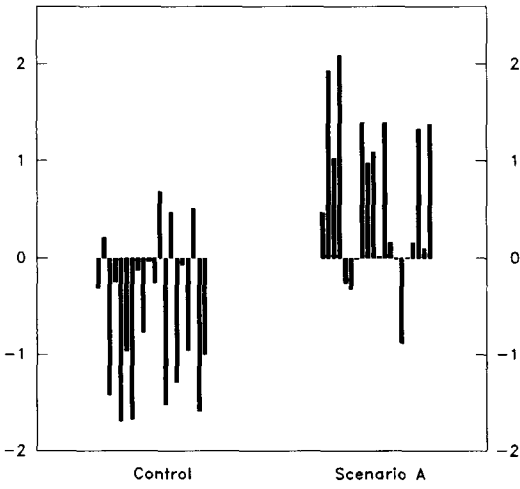


Fig.3: Standardisierte Werte des südhemisphärischen Meridionalgradienten der monatsgemittelten 300/1000 hPa Schichtdicke zwischen Subtropen und Subpolarbereich in den Monaten Januar und Februar der Hamburger Klimamodell-Jahre 91-100 für Kontrollfall und Szenario A.

Natürlich gelten auch für derartige Studien die eingangs aufgeführten Einschränkungen, und überdies kann es sich grundsätzlich immer nur um bedingte Vorhersagen handeln, die auf bestimmten Annahmen beruhen (etwa hinsichtlich der weiteren natürlichen Klimaentwicklung oder des Fortgangs anthropogener Spurengasfreisetzung). Eine zusätzliche, oft nicht bedachte Unsicherheit erwächst aus der prinzipiellen Unklarheit über den Grundtypus unseres Klimasystems, ein Aspekt, auf dessen Bedeutung z.B. FLOHN (1988, S.90) immer wieder hingewiesen hat. Besitzt es bei gegebenen Randbedingungen nur eine einzige mögliche Zustandsform oder mehrere alternative, vollziehen sich Zustandswechsel streng deterministisch nur bei geänderten Randbedingungen oder auch schon bei intermittierenden Störungen oder gar aus der Eigendynamik des Systems selbst heraus? LORENZ (1976) hat zur Demonstration dieser Systemvarianten eine möglichst einfache Rekursionsgleichung dritten Grades angegeben, die in Fig. 4 für jeweils 300 hypothetische Zeitschritte mit ausgewählten Werten der "Systemkonstanten" c und verschiedenen Anfangswerten y_0 dargestellt worden ist. Die ersten drei Verlaufsfälle mit $c = 0.90$ kennzeichnen ein stabiles System ("transitiv"), das bei vorübergehenden Störungen (hier durch verschiedene y_0 -Werte repräsentiert) nach gewisser Zeit wieder in seinen einzigen Grundzustand einpendelt. Verkleinert man die Konstante c nur um 0.05, so resultiert ein sog. intransitives System, das verschiedene Grundzustände kennt (hier im positiven bzw. im negativen Wertebereich ausgebildet), die je nach Anfangswert y_0 wahlweise angenommen werden. Übergänge von einem in den anderen Zustand können dabei nur durch eine äußere Störung ausgelöst werden. Bei erneut geringfügig geänderter Konstanter c dagegen vollzieht das System ohne äußeren Einfluß aus sich selbst heraus unregelmäßige Zustandswechsel, deren Abfolge sich überdies schon bei nur insignifikant differierenden Anfangswerten (hier jeweils nur um 10^{-4}) völlig andersartig gestaltet. Derartige fast-intransitive Systeme zeigen also rasche Umstellungen zwischen variabel anhaltenden quasi-stationären Zuständen, wobei bereits geringfügige äußere Störungen oder nur leicht modifizierte Randbedingungen genügen, um gänzlich andere Verlaufsformen zu induzieren.

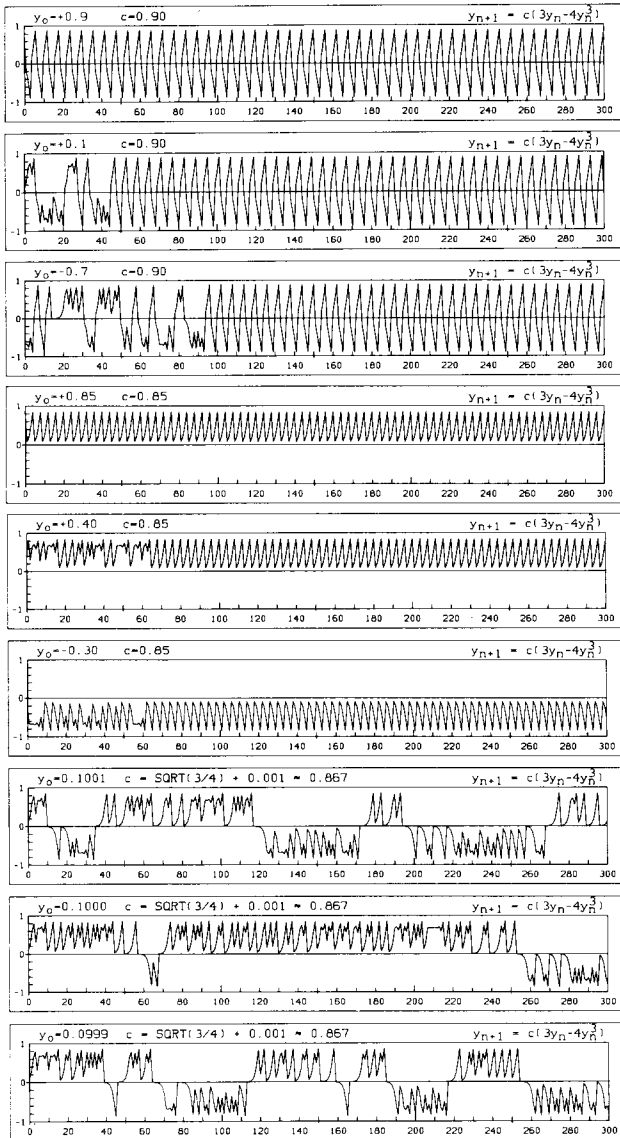


Fig.4: Unterschiedliche Verlaufsformen bei verschiedenen Systemtypen, dargestellt anhand einer Lorenz-Gleichung in Abhängigkeit von der Konstanten c und dem Anfangswert y_0 .

Es braucht nicht weiter ausgeführt zu werden, wie aussichtslos eine Abschätzung künftiger Klimaänderungen wäre, wenn sich unser Klimasystem als derartig deterministisch-chaotisch erweisen sollte. Überdies ist auch nicht auszuschließen, daß sich durch künstliche Eingriffe in ein natürliches System eine seiner kritischen Konstanten leicht verändert (analog zur Vorgabe unterschiedlicher c -Werte in Fig. 4), wodurch selbst der Grundtypus des Systems transformiert werden kann. Angesichts solcher Unwägbarkeiten gebietet es sich nachdrücklich, anthropogene Eingriffe in unser nicht vollständig verstandenes Klimasystem so wirkungsvoll wie möglich zu begrenzen. Wissenschaftliche Anstrengungen werden aber verstärkt darauf zu richten sein, unseren Kenntnisstand über die komplexe Größe Klima auch systemanalytisch zu erweitern und so zu besseren Abschätzungen ihrer zeitlichen Entwicklungsdynamik zu gelangen. Dies ist umso dringlicher, als weitgespannte Auswirkungen von Klimaänderungen auf natürliche Umweltfaktoren und menschliche Existenzbedingungen zu gewärtigen sind (HUPFER 1991, S.405ff.), und all dies wird sich immer in vielfältigen räumlichen Differenzierungen ausbilden, mit denen sich gerade die geographische Klimaforschung weiter zu befassen haben wird.

Literatur:

- BUDYKO, M.I., N.A. YEFIMOVA & I. Yu. LOKSHINA (1990): Anticipated Human Modifications of Global Climate.- In: Soviet Geography 31: 11-23.
- FLOHN, H. (1988): Das Problem der Klimaänderungen in Vergangenheit und Zukunft.- Wiss. Buchges. Darmstadt.
- FLOHN, H. (1989): Wo bleibt das Erwärmungssignal? Das CO₂-Problem in globaler Sicht.- In: Die Geowissenschaften 7: 31-37.
- GLASER, R. (1991): Klimarekonstruktion für Mainfranken, Bauland und Odenwald anhand direkter und indirekter Witterungsdaten seit 1500.- Paläoklimaforschung 5.
- HAGEDORN, H. (1992): Klimaänderungen und ihre Auswirkungen in regionaler Sicht.- In: Matinée im Bayerischen Landtag (Hrsg. vom Bayer. Landtag): 74-106.
- HAGEDORN, H. & R. GLASER (1990): Zur methodischen Konzeption und Regionalisierung in der Paläoklimatologie.- In: Berliner Geographische Abh. 53: 251-260.
- HASSELMANN, K. (1990): How well can we predict the climate crisis?- Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 57.
- HOUGHTON, J.T., G.J. JENKINS & J.J. EPHRAUMS (1990; Hrsg.): Climate Change. The IPCC Scientific Assessment.- Cambridge Univ. Pr.
- HUPFER, P. (1991; Hrsg.): Das Klimasystem der Erde.- Akad. Verl. Berlin.
- JACOBET, J. (1993): Regionale Unterschiede im atmosphärischen Zirkulationsgeschehen bei globalen Klimaveränderungen.- In: Die Erde 124: 63-77.
- LORENZ, E.N. (1976): Nondeterministic theories of climatic change.- In: Quaternary Research 6: 495-506.
- SCHÖNWIESE, Ch.-D. (1991): Das Problem menschlicher Eingriffe in das Globalklima ("Treibhauseffekt") in aktueller Übersicht.- Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Ser. B, Bd. 3.
- SCHÖNWIESE, Ch.-D. & K. RUNGE (1991): Some updated statistical assessments of the surface temperature response to increased greenhouse gases.- In: International Journal of Climatology

11: 237-250.

- SEGGERN, J. von (1992): Empirische Modelle regionaler Klimaänderungen in Westeuropa und Bayern.- Diss. Universität Erlangen-Nürnberg.
- STORCH, H. von, E. ZORITA & U. CUBASCH (1991): Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime.- Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 64.

Jucundus Jacobeit
Geographisches Institut
Universität Würzburg
Am Hubland
D-97074 Würzburg