

DIE ERDE

ZEITSCHRIFT DER GESELLSCHAFT FÜR ERDKUNDE ZU BERLIN

121. Jahrgang · 1990

Herausgegeben durch

HEINZ HEINEBERG (Münster) – KARL LENZ (Berlin)
HARTMUT LESER (Basel) – KLAUS MÜLLER-HOHENSTEIN (Bayreuth)
FRED SCHOLZ (Berlin)

Unter Mitwirkung von

M.S. ABULEZZ (Kairo) – ST. HELMFRID (Stockholm)
F. REITEL (Metz) – K. STIGLBAUER (Wien)
H. TH. VERSTAPPEN (Enschede) – H. WILHELMY (Tübingen)

Schriftleitung:

JOHANNES GEHRENKEMPER – KIRSTEN GEHRENKEMPER



GESELLSCHAFT FÜR ERDKUNDE ZU BERLIN

Gedruckt mit Förderung der Senatsverwaltung für Wissenschaft und Forschung

ISBN 3-87670-990-3

ISSN 0013-9998

Copyright 1990 by Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, D-1000 Berlin 41 (Steglitz), Arno-Holz-Straße 14. – Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe, der Herstellung von Mikrofilmen und der Übersetzung, vorbehalten.

Druck: G. Weinert GmbH, D-1000 Berlin 42

Satz: Dr. K. Zillbach, D-1000 Berlin 62.

DIE ERDE	121	1990	S. 241 - 253	Methoden Beitrag
----------	-----	------	--------------	------------------

• *Klimaanomalie - Zirkulationsmuster - Tropen*

Jucundus Jacobeit (Augsburg)

Zum Phänomen großräumiger Klimaanomalien - Beispiele hochreichender Bewölkung und zugehöriger Zirkulationsmuster aus dem zirkumatlantischen Bereich der Tropen

Mit 3 Figuren und 1 Tabelle

Anhand markanter jahreszeitlicher Häufigkeitsanomalien hochreichender Bewölkung im tropischen Bereich zwischen Ostpazifik und Westindien wird das Phänomen großräumiger Klimaanomalien beispielhaft illustriert und zirkulationsdynamisch analysiert. Dabei dienen tägliche satellitenbild-gestützte Angaben über das Auftreten stark reflektierender Bewölkung aus dem Zeitraum 1971-1985 als empirische Datengrundlage für die diagnostische Selektion klimatischer Konvektionsanomalien und tägliche Gitternetzfelder der horizontalen Windkomponenten im 200- und 700 hPa-Niveau als Datenbasis für die Zirkulationsanalyse. Diese stützt sich einmal auf die Hauptkomponentenanalyse der Höhenströmung in den betrachteten Anomaliephasen, zum anderen auf die Abweichungen eines Zyklonalwellenindex im unteren Troposphärenniveau. Es gelingt, konvektionsanomaliespezifische Zirkulationsmuster herauszuarbeiten, die charakteristische Anordnungsformen konvektionsfördernder und -beeinträchtigender Momente in spezifischen großräumigen Strukturen zeigen. Abschließend wird die generelle Bedeutsamkeit von Klimaanomalie-Untersuchungen hervorgehoben.

Summary: The phenomenon of large-scale climatic anomalies - examples of highly reflective clouds and associated circulation patterns from the circum-atlantic region of the tropics

Referring to seasonal anomalies of organized convection within the tropical region between the eastern Pacific and western Indian oceans, the phenomenon of large-scale climatic anomalies is illustrated by some marked events and subsequently analysed with respect to associated circulation features. The data base consists of, firstly, satellite-derived daily frequencies of highly reflective clouds within the period 1971-1985, and, secondly, of daily grids of horizontal wind components at the 200 and 700 hPa levels. The circulation study relies on, firstly, principal components analysis of the upper level

air flow, and, secondly, on deviations found in a cyclonic wave index at the lower tropospheric level. As a result, there are circulation patterns specific to convective anomalies, showing characteristic arrangements of features that stimulate or retard convection within well-defined large-scale structures. In conclusion, the general significance of studies on climatic anomalies is emphasized.

Résumé: Phénomène d'anomalies climatiques sur une grande étendue - exemples de nuages élevés et de circulations associées dans la région du cercle atlantique des tropiques

Sur la base d'anomalies saisonnières marquées de nuages élevés dans la région des tropiques entre l'est du Pacifique et l'ouest de l'océan Indien, le phénomène d'anomalies climatiques sur une grande étendue est illustré de manière exemplaire et analysé en tenant compte de la circulation dynamique qui lui est associée. Des données reposant sur des images-satellites journalières permettent de vérifier l'apparition de nuages hautement réfléchissants dans la période située entre 1971-1985 et servent de base de données empiriques pour la sélection diagnostique d'anomalies climatiques se rapportant à la convection; les grilles quotidiens des vents horizontaux au niveau de 200 et 700 hPa servent de base de données pour l'analyse circulaire. Cette analyse de la circulation repose d'une part sur l'analyse des principaux composants des hauts courants dans les phases d'anomalies considérées et d'autre part sur les déviations d'un index d'ondes cycloniques au niveau bas de la troposphère. On parvient ainsi à dégager des modèles de circulation spécifiques aux anomalies de la convection, des modèles qui montrent des arrangements caractéristiques des éléments qui favorisent ou nuisent à la convection dans des structures particulièrement étendues. Pour finir, l'importance générale des recherches d'anomalies climatiques est soulignée.

1. Einführung

Seit Datengrundlage und Auswertungsinstrumentarium die zunehmende Ausweitung unseeres klimatologischen Kenntnisstandes ermöglicht haben, sind verstärkt bestimmte Anomalien im Zustand der Atmosphäre erkennbar geworden, die sich durch zwei Spezifika auszeichnen. Zum einen erfassen sie - teils mit wechselndem Vorzeichen, aber prozeßhaft zusammengehörig - weitgespannte Gebiete transkontinentalen Ausmaßes gleichzeitig oder nur leicht zeitverschoben, zum anderen sind sie von ihrer charakteristischen Andauerzeit (mehrere Wochen bis einige Jahre) dem jenseits von Wetter und Witterung liegenden langperiodischen Schwankungsspektrum der Atmosphäre zuzuordnen, also als klimatisch einzuordnen (*Hasselmann und Herterich 1977*). Das bekannteste Phänomen dieser Art ist die sog. El-Niño-Anomalie, bei der in Begleitung mehrmonatig ungewöhnlich erhöhter Meeresoberflächentemperaturen im zentralen und östlichen Äquatorialpazifik nicht nur dortselbst hochsignifikante Niederschlagsabweichungen auftreten, sondern noch in weit entfernten Regionen (teils bis in die Außertropen) damit zusammenhängende Anomalien beobachtet werden (*Yarnal 1985; Yarnal und Kiladis 1985*). Die hervorgehobene Bedeutung derartiger Klima-anomalien liegt aber nicht nur in ihrer unmittelbaren Wirksamkeit auf großräumig betroffene Regionen, sondern auch in ihrer Eigenschaft, spezifische Zustandsformen der Atmosphäre in Abhängigkeit von inneren Ablaufgesetzmäßigkeiten und äußeren Randbedingungen zu konstituieren.

Die möglichst fundierte Kenntnis dieser Zustandsformen und ihrer Bedingtheiten wiederum gewinnt über die verbesserungsbedürftige Erfäßbarkeit natürlicher Klimaschwankungen hinaus noch zusätzliche Bedeutsamkeit durch die anthropogene Beeinflussung des Makroklimas, die ja nicht nur globale Haushaltsgrößen modifiziert, sondern über die Veränderung wichtiger Zirkulationsparameter (z.B. horizontalen und vertikalen Energiegradienten) auch Beschaffenheit und Auftretshäufigkeit atmosphärischer Zustandsformen beeinflussen wird. Erst bei genauerer Kenntnis der natürlichen Klimavariabilität und ihrer Steuerungsmechanismen lassen sich begründete Aussagen über die regional diffe-

renzierte Wirklichkeit eines veränderten Globalklimas treffen.

Die Untersuchung derartiger Fragestellungen kann prinzipiell auf zweierlei Arten erfolgen: entweder über numerische Klimamodelle, die die realen Vorgänge in umfangreichen Gleichungssystemen beschreiben und insbesondere die Simulation alternativer oder anomaler Gegebenheiten erlauben, oder aber über empirisch-diagnostische Methoden, mittels derer aus umfangreichem Datenmaterial charakteristische Zustands- oder Verlaufsformen herauskristallisiert werden, die durch Analogiebildung oder Extrapolation auch auf sich wandelnde Gegebenheiten übertragen werden können. Während die numerische Modellentwicklung und -anwendung weitgehend in Händen meteorologischer Klimaforschung liegt, eröffnet sich gerade der räumlich orientierten Geographie auf empirisch-diagnostischem Sektor ein breites Betätigungsfeld, das gemessen an seiner aktuellen Bedeutsamkeit und seinem internationalen Stellenwert im deutschsprachigen Bereich erst vergleichsweise geringe Beachtung gefunden hat.

Der vorliegende Beitrag soll sich deshalb mit einigen Aspekten großräumiger Klima-anomalien beschäftigen, wobei als Bezugsregion die weitere Umgebung des tropischen Atlantik herausgegriffen wurde, also ein Gebiet von rund einem halben Erdumfang zwischen östlichem pazifischen und westlichem indischen Ozean im niederen Breitenbereich beider Hemisphären. Dieses Gebiet hat bislang weniger umfangreiche Aufmerksamkeit erfahren als etwa der tropische Pazifik mit seiner markanten El-Niño-Anomalie, wenngleich auch hier bedeutsame Umstellungen im Klimasystem festgestellt worden sind (*Lamb, Pepler und Hastenrath 1986; Horel, Kousky und Kagano 1986*).

Generell läßt sich für die Tropen sagen, daß klimatische Anomalien dort ihren sinnfälligsten Ausdruck im variablen Konvektions- und Niederschlagsgeschehen finden; Meßstationen aber sind in diesem Bereich oft nicht in hinreichendem Ausmaß vorhanden oder fehlen gerade in den ozeanischen Räumen fast völlig. Dank der Satellitentechnologie lassen sich jedoch seit einiger Zeit zumindest Angaben über den Wassergehalt der Atmosphäre und über die Bewölkungsver-

hältnisse machen, und das flächendeckend und damit insbesondere auch für die großen Ozeangebiete. Darauf aufbauend sind sogar verschiedene Verfahren der Niederschlagsabschätzung entwickelt worden (*Garcia 1981; Rao 1984; Martin und Howland 1986*), die allerdings nicht immer und überall zu verlässlichen Ergebnissen führen (*Richards und Arkin 1981: 1092; Jacobeit 1989: 95f.*). Hochreichende tropische Konvektionsbewölkung, die z.B. im sichtbaren Spektralbereich durch ihr besonders hohes Reflektionsvermögen in überdurchschnittlicher Helligkeit hervortritt, läßt sich jedoch auch direkt als Maß für Verbreitung und Auftretshäufigkeit aktiver organisierter Konvektion und damit als Indikator für unterschiedliche Zustandsformen der tropischen Atmosphäre begreifen. Im folgenden werden deshalb großräumige Häufigkeitsanomalien stark reflektierender Bewölkung (*highly reflective clouds <HRC>*) als diagnostische Grundlage tropischer Klimaanomalien herangezogen und in einigen zirkulationsdynamischen Begleitumständen analysiert. Aufgrund der erst relativ kurzen Datenreihe (Beginn 1971) konzentriert sich die Untersuchung auf anomale Zustandsformen in einzelnen Jahreszeiten oder repräsentativen Einzelmonaten, die jedoch in ihrem essentiellen Aussagegehalt auch für alternative Zeitskalen Gültigkeit behalten (*Kap. 5*). Nachdem an anderer Stelle vornehmlich sommermonsunale Verhältnisse der jeweiligen Hemisphäre untersucht worden sind (*Jacobeit 1989*), soll sich der vorliegende Beitrag mit beiderseits des Äquators ausgebildeten Gegebenheiten beschäftigen; dies ermöglicht sich in konvektionsbezogenen Untersuchungen am ehesten bei relativ äquaturnaher Lage der sog. innertropischen Konvergenzzone, weshalb wir uns im folgenden auf die (im außertropischen Zyklus sogenannten) Übergangsjahreszeiten beschränken.

2. HRC-Häufigkeitsanomalien

2.1 Datengrundlage und Vorgehensweise

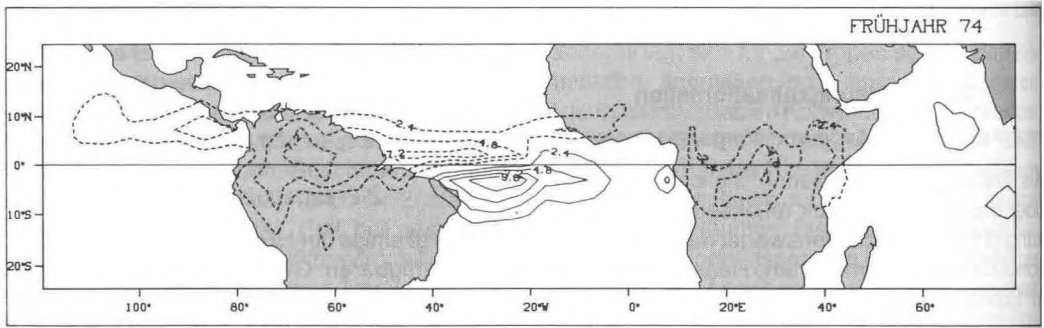
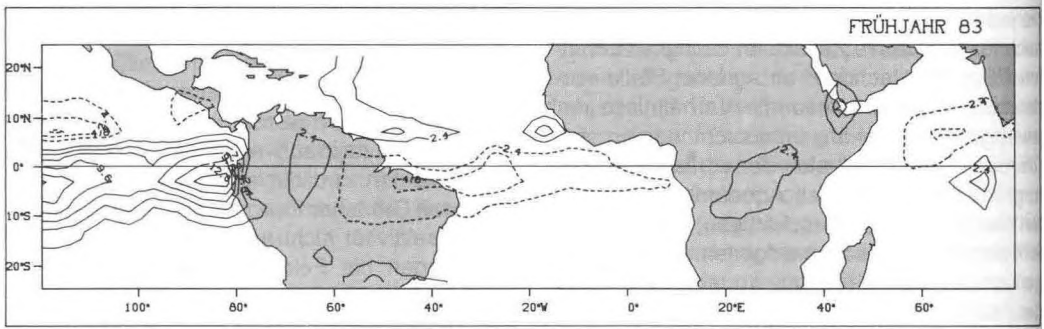
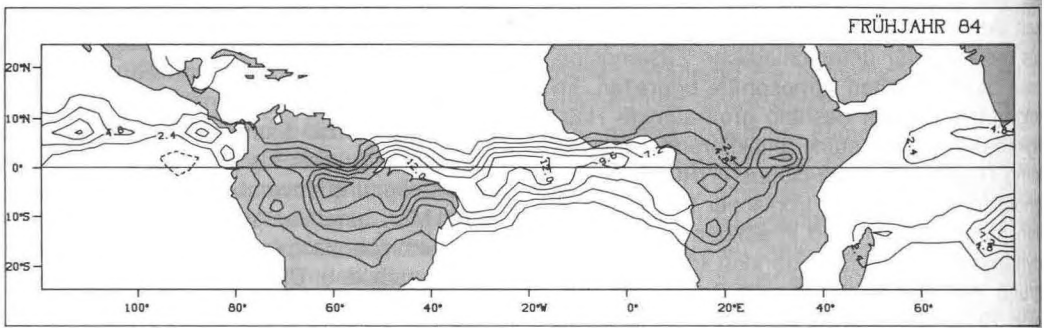
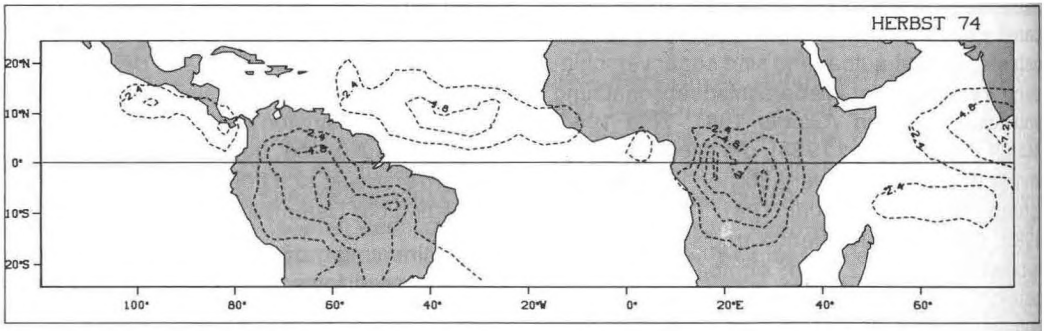
Als Datengrundlage dienen tägliche Angaben über das Auftreten stark reflektierender Bewölkung (HRC), die dankenswerterweise vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder (Colorado) zur Verfügung gestellt

worden sind. Sie basieren auf Wettersatellitenbildern im sichtbaren Spektralbereich, die bei polarer Umlaufbahn jeweils nahe des örtlichen Mittagstermins entstanden sind. Erfasst ist der tropische Breitenstreifen zwischen 25° N und 25° S in 1° x 1° Auflösung, der verfügbare Gesamtzeitraum erstreckt sich über die ersten 15 Jahre seit Beginn der Datenreihe (1971-1985).

Zur Bestimmung großräumiger Häufigkeitsanomalien wurden folgende Zusammenfassungen vorgenommen: a) Bildung von 5° x 5° Gebieten, die somit jeweils 25 Einzelinformationen umfassen und den betrachteten Längenausschnitt zwischen 120° W und 80° E in einer Gesamtanzahl von 40 x 10 überdecken. b) Jahreszeitliche Zusammenfassung der täglichen HRC-Angaben, wobei aus internen Konsistenzgründen eine Beschränkung auf die Monate April und Mai (im folgenden willkürlich als Frühjahr bezeichnet) bzw. Oktober und November (Herbst) angezeigt war (im März bzw. September sind noch zu verbreitet hemisphärisch sommermonsunale Strukturen ausgebildet). Die jahreszeitliche Gebiets-HRC-Häufigkeit ergibt sich dann als prozentualer HRC-Auftretswert bezogen auf das theoretische Maximum täglichen HRC-Auftretens an allen Gitterpunkten, die entsprechende Häufigkeitsanomalie als einzeljahreszeitliche Abweichung vom zugehörigen jahreszeitlichen Mittelwert 1971-1985. Eine Standardisierung dieser Abweichungen wurde nicht vorgenommen, um Extremwerte in konvektionsarmen Regionen zu vermeiden und die energetisch relevanten absoluten Größenordnungsunterschiede der Konvektionsaktivität nicht herauszufiltern. Schließlich wurden die Felder jahreszeitlicher HRC-Häufigkeitsanomalien interpolativ in Isanomalienform dargestellt, wobei als Äquidistanz das Mittel aller HRC-Standardabweichungen im gesamten Untersuchungsgebiet zugrundegelegt wurde. Die resultierenden Verteilungsbilder geben Auskunft über die räumliche Verbreitung von über- und unterdurchschnittlicher Konvektionsaktivität und damit über klimatisch anomale Zustandsformen auf der saisonalen Zeitskala.

2.2 Ergebnisbeispiele

Fig. 1 zeigt einige der HRC-Verteilungsbilder aus dem verfügbaren Gesamtzeitraum, die unter folgenden Gesichtspunkten herausgegriffen



worden sind: a) möglichst markante Anomalien in möglichst weiter Verbreitung; b) großräumiger Zusammenhang und einfach strukturierte Anordnung der Anomalien. Dies bedeutet, daß unter den hier nicht berücksichtigten Verteilungsbildern weitere ähnliche, aber weniger deutliche, räumlich begrenztere oder unzusammenhängendere sowie kleinräumiger strukturierte verbleiben. Die Auswahl von wenigen einfach, aber deutlich ausgestalteten Verteilungsbildern erlaubt zwar keine vollständige Behandlung jahreszeitlicher Anomalieverteilungsmuster, ermöglicht aber die hier intendierte exemplarische Problemdarstellung großräumiger Klimaanomalien in überschaubarer und leichter vermittelbarer Weise.

Wie aus *Fig. 1* ersichtlich, treten Jahreszeiten mit generell reduzierter Konvektionsaktivität fast im gesamten Großraum auf: abgesehen vom so wieso meist trockenen äquatornahen Südostpazifik bleibt im Herbst 1974 als einzige Großregion der tropische Südatlantik ohne signifikante Negativabweichung, ansonsten dominieren über kontinentalen wie über ozeanischen Gebieten weiträumige Negativanomalien, die vor allem über Südamerika sogar weit polwärts reichen. Ganz anders dagegen stellt sich die konvektive Situation im Frühjahr 1984 dar: jetzt zieht sich zu beiden Seiten des Äquators ein zusammenhängendes Band positiver Anomalien von Südamerika über den Atlantik bis nach Zentralafrika, lediglich östlich davon findet es eine gewisse Unterbrechung, während der einzige Ort mit begrenzter Negativabweichung im äquatorialen Ostpazifik auszumachen ist.

Stärker gemischte Anomalieverteilungen zeigen dagegen die verbleibenden Beispiele: das Frühjahr 1983 mit kräftigen Positivabweichungen im östlichen Äquatorialpazifik, wie es dem Höhepunkt des damaligen El-Niño-Ereignisses

entspricht, weiter östlich abgelöst von negativen Anomalien über Nordost-Brasilien und äquatorialem Atlantik, die ihrerseits wieder von leichten Positivabweichungen über Teilen des nördlichen Atlantiks und Zentralafrikas umgeben sind. Das Frühjahr 1974 schließlich zeigt ein markantes Gebiet positiver Anomalien im äquatornahen Südatlantik sowie großräumig erstreckte Negativabweichungen über Südamerika, äquatornahem Nordatlantik und zentralem Afrika.

Diese vier musterhaften Anomalieverteilungen tropischer Konvektionsaktivität repräsentieren also unterschiedliche Zustandsformen des saisonalen Klimas und sollen im folgenden auf einige zirkulationsdynamische Bedingungsbeziehungen hin untersucht werden.

3. Methodik der Zirkulationsanalyse

Für das Verständnis großräumiger Klimaanomalien sind die Strömungsverhältnisse sowohl der höheren als auch der niederen Troposphäre von maßgeblicher Bedeutung. Erstere z.B. durch die von der Dynamik der Horizontalströmung abhängige Verteilung der Höhenkonvergenz- und -divergenzgebiete, die retardierend bzw. stimulierend auf die allgemeine Konvektionsaktivität einwirken, zweitere durch die in den Tropen meist im 600-700 hPa-Niveau besonders gut ausgebildeten easterly waves (Reed 1978), deren Häufigkeit und Intensität das Ausmaß organisierter Konvektion wesentlich mitbestimmen. Für die Zirkulationsanalyse sind deshalb (erneut vom NCAR bereitgestellte) tägliche Gitternetzfelder der horizontalen Windkomponenten im 200- und 700 hPa-Niveau herangezogen worden, wobei eine räumliche Auflösung mit Schnittpunktabständen zugrundeliegt, die einer fünf Längengrad äquivalenten Äquidistanz einer

Fig. 1. Anomalien der prozentualen Auftrittshäufigkeit stark reflektierender Bewölkung (HRC) während vier ausgewählter (nordhemisphärisch benannter) Übergangsjahreszeiten. Die Abweichungen (positiv: durchgezogene Linien; negativ: gestrichelte Linien) beziehen sich auf den saisonalen Mittelwert 1971-1985
Frequency anomalies (%) of highly reflective clouds (HRC) during four selected transitional seasons (according to northern hemispheric denotation). Deviations (positive: continuous lines; negative: dashed lines) refer to the seasonal average 1971-1985

Mercator-Projektion entsprechen. Zur Erfassung von Zirkulationscharakteristika, die Phasen der oben gezeigten Konvektionsanomalien kennzeichnen, ist in den beiden Niveaus wie folgt vorgegangen worden.

3.1 Hauptkomponentenanalyse der troposphärischen Höhenströmung

Da die Gesamtheit aller täglichen Windfelder selbst in Zeitabschnitten einer bestimmten Anomalie noch äußerst vielgestaltig ist und mittlere Felder längerer Zeitspannen bereits kontrastarm nivelliert sind, bietet sich zur Ermittlung der im oberen Troposphärenniveau besonders interessierenden Hauptmerkmale der Strömungskonfiguration während der verschiedenen anomalen Jahreszeiten die multivariate Methode der Hauptkomponentenanalyse an. Dabei fungieren im sog. T-Modus die verschiedenen Windfelder der betrachteten Zeitabschnitte als Variable, die zugrundeliegenden Gitternetzpunkte als Ereignisfälle. Die resultierenden Windfelder der Hauptkomponentenwerte (scores) repräsentieren dann die wesentlichen Höhenströmungsmuster aus der Gesamtheit der einbezogenen Strömungskonfigurationen, die aus den Ladungen ableitbaren Erklärungsanteile der einzelnen Hauptkomponenten an der Varianz der Variablen geben die Gewichtung der jeweiligen Höhenströmungsmuster in den originalen Windfeldern wieder. Bei Mittelung dieser Varianzerklärungsanteile über längere Zeiträume (z. B. Jahreszeiten) ergeben sich unterschiedliche Bedeutsamkeiten der verschiedenen Höhenströmungsmuster in der Zirkulationssteuerung dieser zusammengefaßten Zeiträume; damit lassen sich verschiedene Zeitabschnitte wie die oben gezeigten anomalen Jahreszeiten durch unterschiedliche Steuerungstendenzen charakterisieren. Wie an anderer Stelle ausführlich erörtert (Jacobeit 1989: 119 ff.), empfehlen sich bei derartigen Strömungsanalysen geeignete Initialmittelungen der Eingangsvariab-

len (z. B. pentadengemittelte statt tägliche Windfelder), Orthogonalrotationen der Hauptkomponenten sowie Destandardisierungen der Hauptkomponentenwerte.

3.2 Zyklonalwellenindex-Verteilung in der unteren Troposphäre

Zur Erfassung der variablen Wirksamkeit niedertroposphärischer Wellen eignen sich dagegen hauptkomponentenanalytische Strömungsmuster nicht so sehr wie Verteilungen geeigneter Zirkulationsparameter. In erster Linie wäre dabei an die Vertikalkomponente der relativen Vorticity zu denken, die allerdings neben den Krümmungsanteilen auch Scherungsbeträge enthält, wie an ihrer Darstellung in natürlichen Koordinaten

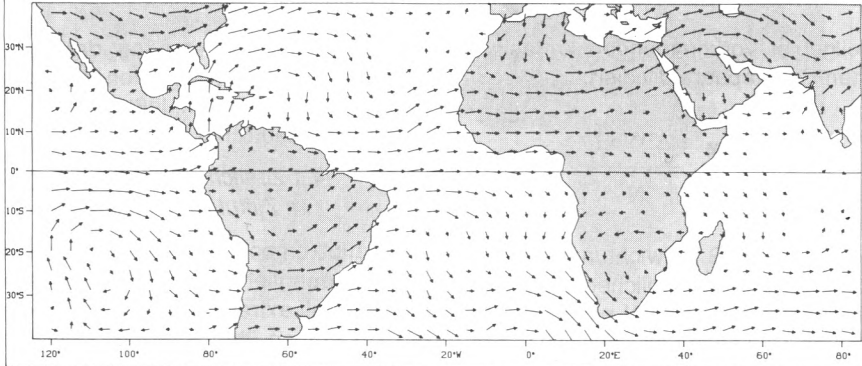
$$\xi = \frac{V}{r} - \frac{\delta V}{\delta n}$$

zu erkennen ist (V : Horizontale Windgeschwindigkeit; r : Krümmungsradius der Stromlinien; n : Normale zur Tangentialrichtung des Windes; δ : partieller Ableitungsoperator). Zur Beurteilung rein wellenförmiger Strukturen erscheint jedoch die alleinige Berücksichtigung des Krümmungsterms vorteilhafter, der allerdings aus Gitternetzdaten nicht unmittelbar zu bestimmen ist. Deshalb wurde ein einfacher Index entwickelt, der das Ausmaß gekrümmter Verlaufsformen der Horizontalströmung (im weiteren auf den Fall zyklonaler Krümmung beschränkt) für festgelegte Teilgebiete aus Gitternetzangaben der Windrichtung abzuschätzen gestattet. Dazu wurde das Untersuchungsgebiet in $10^\circ \times 10^\circ$ -Teilgebiete untergliedert und in jedem die Windrichtungsdifferenz Δ für alle zonal oder meridional benachbarten Gitternetzpunktpaare bestimmt. Alle Differenzen Δ^{zyk} , die Abschnitten zyklonal gekrümmter Verlaufsformen entstammen (Anzahl n_{zyk}), werden für jedes Teilgebiet aufsummiert und durch die Gesamtanzahl N

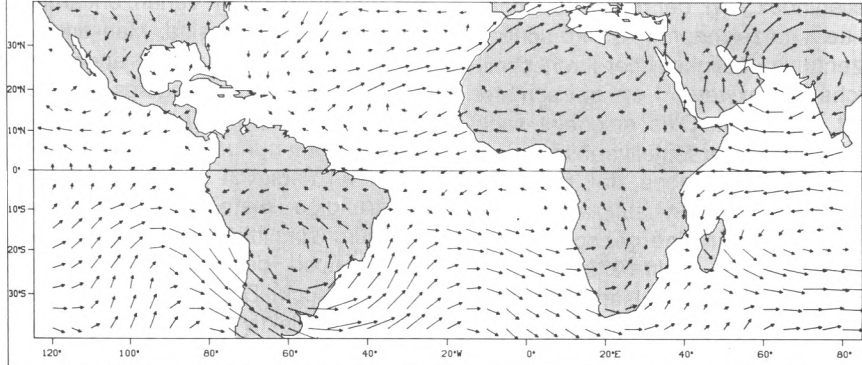
Fig. 2. Resultierende Windfelder der ersten vier Hauptkomponenten der pentadengemittelten 200 hPa-Strömung in repräsentativen Einzelmonaten der anomalen Jahreszeiten aus Fig. 1 (vgl. Tab. 1). Die bildliche Reihenfolge der Hauptkomponenten richtet sich nach den maximalen Varianzerklärungsanteilen in den Repräsentanzmonaten (vgl. Tab. 1)

Resulting vector wind fields of principal components 1-4 of the pentad averaged 200 hPa flow during months representing the anomalous seasons of fig. 1 (see tab. 1). Pictorial sequence of the principal components according to maximum percentages of explained variance during the representing months (see tab. 1)

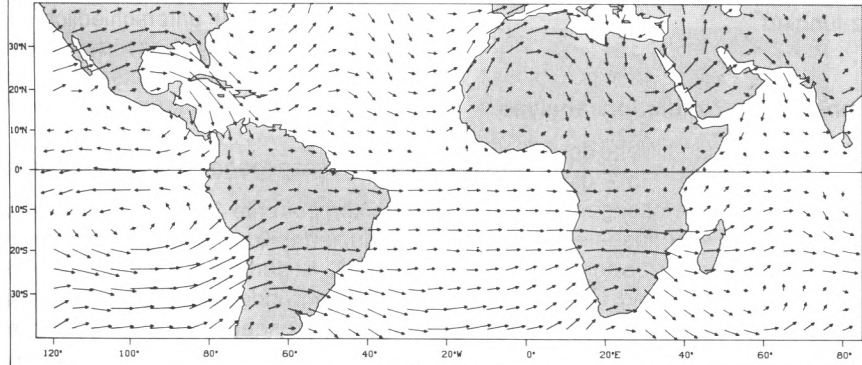
HAUPTKOMPONENTE 2



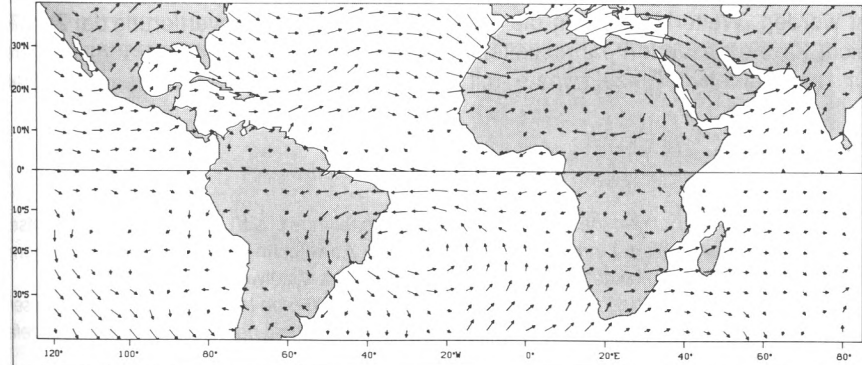
HAUPTKOMPONENTE 4



HAUPTKOMPONENTE 3



HAUPTKOMPONENTE 1



aller im Teilgebiet vorkommenden kartesisch benachbarten Punktepaare dividiert:

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i^{\text{zyk}} \cdot G_i}{N}$$

Dabei bezeichnen die G_i Gewichtungsfaktoren entsprechend der unterschiedlichen Distanzen bei der Differenzbildung, und N nimmt für die oben genannten Teilgebiete mit jeweils 9 Gitternetzpunkten den konstanten Wert 12 an. Als Zyklonalwellenindex ZWI, der ganze Anomaliezeitabschnitte kennzeichnen soll, wird schließlich die prozentuale Häufigkeit überdurchschnittlicher täglicher Indexwerte I im betrachteten Zeitabschnitt eingeführt. Dies erscheint sachadäquater als etwa eine Mittelwertbildung vor allem angesichts der Tatsache, daß relativ flache Wellen, die in den Tropen häufig ausgebildet sind, oft keine oder nur eine geringe Wetterwirksamkeit zeigen (vgl. Riehl 1979: 336). Zur Darstellung in kontinuierlicher Isanomalienform gelangen die standardisierten 700 hPa ZWI-Abweichungen vom zugehörigen langzeitlichen Mittelwert, wobei die halbe Normabweichung als Äquidistanz fungiert.

4. Ergebnisse der Zirkulationsanalyse

Fig.2 zeigt die resultierenden Werte der 200 hPa Hauptkomponentenanalyse, Fig.3 die interpolierten 700 hPa ZWI-Abweichungen. Um die bedeutsamen Wechselwirkungsbereiche zwischen tropischer und außertropischer Zirkulation miteinzubeziehen (Gray und Clapp 1978), sind die Darstellungsbereiche auf beiden Hemisphären um mehr als 10 Breitengrade über die polwärtigen Ränder der HRC-Daten hinaus ausgedehnt worden. Weiterhin werden die Ergebnisse nicht für die gesamten Jahreszeiten, sondern für repräsentative Einzelmonate mit

stärkster Anomaliebetonung dargestellt: dies ändert nichts an den gezeigten Grundzügen und ihren Aussagegehalten, läßt sie aber in instruktiver Weise deutlicher hervortreten.

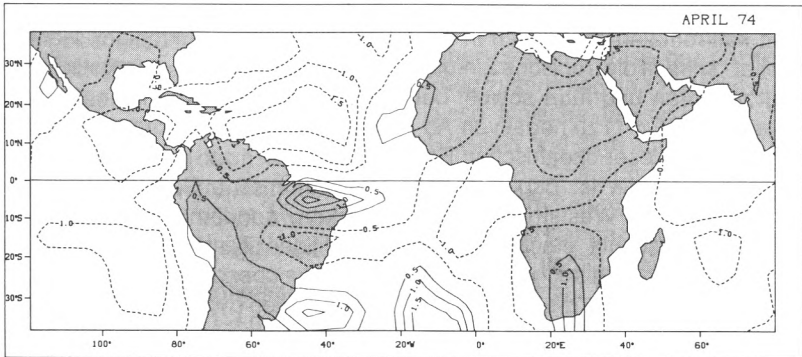
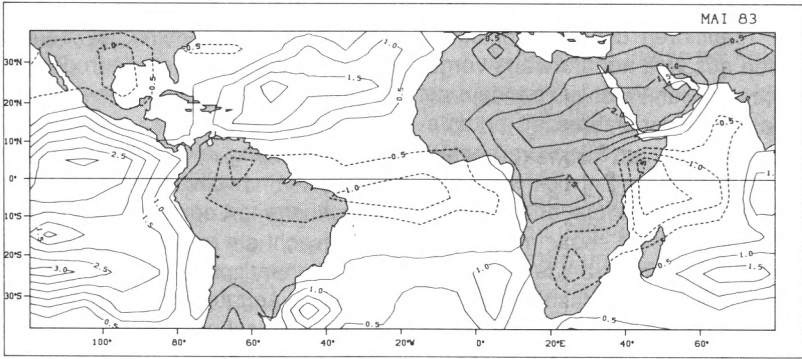
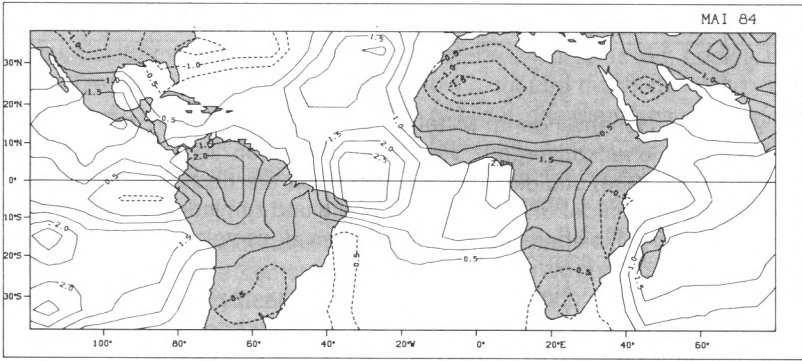
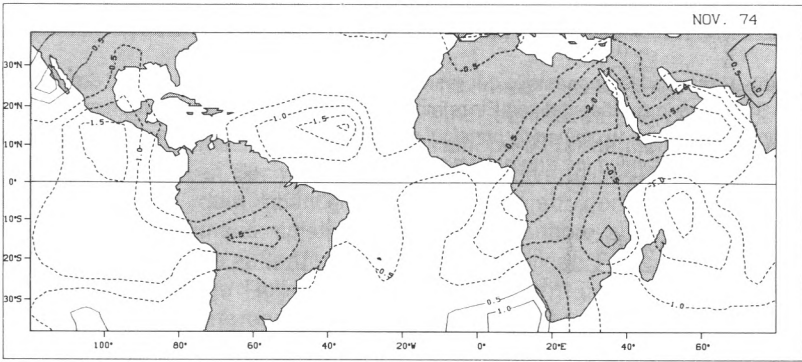
4.1 Zeitliche Differenzierung im Zirkulationsgeschehen

Die Hauptkomponentenanalyse der Höhenströmung in den vier Repräsentanzmonaten ergibt vier sinnhaft extrahierbare Hauptkomponenten, die zusammen über 80% der involvierten Gesamtvarianz erklären und in ihren monatlich zusammengefaßten Varianzerklärungsanteilen in Tab.1 aufgeführt sind. Man erkennt, daß in jedem Anomalie Monat eine andere Hauptkomponente und damit ein anderes Höhenströmungsmuster besonders hervortritt, während die jeweils übrigen nur unterdurchschnittliche Anteile erreichen (lediglich im Mai 1984 ist auch die zweitrangige erste Hauptkomponente leicht überdurchschnittlich repräsentiert, bleibt aber immer noch deutlich hinter der dominanten vierten zurück). Dies bedeutet, daß die aus dem Eingabe kollektiv herausgearbeiteten wesentlichen Höhenströmungsmuster tatsächlich anomaliespezifisch sind, d.h. sie gewinnen jeweils genau in einem der unterschiedlich anomalen Zeitabschnitte (Fig.1) besondere Gewichtung und damit besondere Wirksamkeit im hochtroposphärischen Zirkulationsgeschehen.

4.2 Aussagegehalt der Zirkulationsmuster

Hauptkomponente 2, die während weit verbreiteter reduzierter Konvektionsaktivität bestimmend hervortritt, ist durch nahezu durchgehende westliche Höhenwinde im äquatorialen Bereich des Untersuchungsgebietes gekennzeichnet. Derartige Verhältnisse, die eine massive Beeinträchtigung der tropischen Ostströmung oder gar eine häufige Invertierung der Zonalkomponente im betreffenden Zeitraum indizieren, wirken deswegen konvektionsbeeinträchtigend, weil

Fig. 3. Standardisierte Abweichungen des 700 hPa Zyklonalwellenindex ZWI (siehe Text) in repräsentativen Einzelmonaten der anomalen Jahreszeiten aus Fig. 1. Die Abweichungen (positiv: durchgezogene Linien; negativ: gestrichelte Linien) beziehen sich auf den monatlichen Mittelwert 1971-1985
Standardized anomalies of the 700 hPa cyclonic wave index ZWI (see text) during months representing the anomalous seasons of fig. 1. Deviations (positive: continuous lines; negative: dashed lines) refer to the monthly average 1971-1985



Tab. 1. Prozentuale Varianzerklärungsanteile der ersten vier Hauptkomponenten (Fig. 2) der pentadengemittelten 200 hPa-Strömung in repräsentativen Einzelmonaten der anomalen Jahreszeiten aus Fig. 1
Percentages of variance explained by principal components 1-4 (fig. 2) of the pentad averages 200 hPa flow during months representing the anomalous seasons of fig. 1

Hauptkomponente	1	2	3	4
November 1974	11.3	54.3	7.4	5.3
Mai 1984	25.3	6.9	12.1	37.0
Mai 1983	9.1	11.2	49.8	12.4
April 1974	45.7	17.1	7.9	8.2
Gesamt	22.9	22.4	19.3	15.7

in den Tropen westliche Höhenwinde im Mittel mit einer Tendenz zur Höhenkonvergenz verbunden sind (*Hastenrath* 1969) und die für eine normale Wellenentwicklung in der unteren Troposphäre erforderliche Vertikalerstreckung einer kontinuierlichen Ostströmung bis in die obere Troposphäre (*Riehl* 1979: 312 und 342) nicht hinreichend gegeben ist. Dies bestätigt sich an den ZWI-Abweichungen im November 1974, die in den Tropen fast nur negative Werte zeigen. Nach dem Höhenströmungsmuster von Hauptkomponente 2 resultieren die innertropischen Höhenwestwinde aus weit äquatorwärts vorgeschobenen subtropischen Westwindbändern auf beiden Hemisphären (der Jahreszeit entsprechend im Norden verfrüht, im Süden verspätet), wodurch kein ausreichender Entwicklungsspielraum für eine dazwischengelagerte Ostströmung vorhanden ist. Dies gilt sogar im südamerikanischen Längsbereich, wo beide Westwindbänder antizyklonale Wellenphasen durchlaufen. Stromabwärts über dem Atlantik verschärfen sich bei zyklonaler Wellenphase die äquatorialen Höhenwestwinde wieder. Besonders der kräftige nordatlantische Höhentrog - offensichtlich von keinen kaltfrontalen Prozessen in Bodennähe begleitet - scheint die tropische Zirkulation nachhaltig zu stören und führt sowohl bei ZWI als auch bei HRC (Fig. 1) zu negativen Abweichungen auch über dieser ozeanischen Region. Über dem Südatlantik ist dagegen der äquatorwärts ausgelenkten Westströmung ein antizyklonaler Wellenabschnitt eingelagert; in diesem Bereich verringern sich auch die negativen ZWI-Abweichungen, und die konvektive Aktivität bleibt noch innerhalb normaler Ausma-

ße. Der einzige kleine Bereich mit tropischen Höhenostwinden liegt westlich von Madagaskar, wo auch die höchsten ZWI-Werte in niedriger Breite und zumindest unterbrochene HRC-Anomalien zu verzeichnen sind.

Im Gegensatz zu den ansonsten jedoch generell konvektions-beeinträchtigenden Verhältnissen des obigen Falles stehen die vorherrschenden Gegebenheiten im weitverbreitet konvektions-verstärkten Frühjahr 1984: Hauptkomponente 4, die im Repräsentanzmonat drei- bis siebenmal so stark vertreten ist wie in den übrigen Fällen (Tab. 1), zeigt ganz überwiegend äquatoriale Höhenostwinde, die mit einer gesteigerten Wellenbildung in der unteren Troposphäre einhergehen (weitverbreitet positive ZWI-Abweichungen). Lediglich im ostpazifischen Raum verursacht ein großamplitudiger Höhentrog auf der Südhemisphäre westliche Höhenwinde noch bis zum Äquator; dort nimmt auch die niedertroposphärische Wellenbildung ab, und es zeigt sich die einzige Stelle mit negativen HRC-Anomalien. Die ansonsten äußerst günstigen Konvektionsbedingungen stehen in Zusammenhang mit einer Reihe kräftiger Höhenantizyklonen (über Südamerika, nordöstlichem Südatlantik, Südindien, Nordwest-Indien, Sahara, tropischem Nordatlantik und nordamerikanischer Pazifikküste), die nicht nur auf ihrer äquatorwärtigen Seite tropische Ostwinde erzeugen oder verstärken, sondern - soweit sie keine vertikal mächtigen Zentralhochs mit Absinkbewegung wie etwa über der Sahara, hingegen reine (thermisch oder dynamisch induzierte) Höhenströmungswirbel sind - durch ihr divergentes Aus-

strömen in der Höhe auch direkt konvektionsbelebend zu wirken vermögen. Insbesondere gilt dies im Divergenzbereich zwischen zwei benachbarten Zellen wie etwa in der westlichen Äquatorialregion zwischen dem atlantischen Antizyklonenpaar. Darüberhinaus spielt aber auch die Eingebundenheit in die außertropische Wellenanordnung eine wichtige Rolle, wie an den breiterestreckungslimitierteren HRC-Anomalien im Bereich des südatlantischen Höhentrog gegenüber dem weiteren polwärtigen Ausgreifen in den benachbarten Kontinentalregionen antizyklonaler Wellenphasenzugehörigkeit zu erkennen ist. Bemerkenswert erscheint zudem das Aussetzen positiver HRC-Anomalien über dem östlichen Afrika, das im Kontext gewisser Höhenströmungsdiskontinuitäten und reduzierter Wellenbildungen in der unteren Troposphäre zu sehen ist.

Zum Höhepunkt des El-Niño-Ereignisses im Mai 1983 gewinnt Hauptkomponente 3 entscheidende Bedeutsamkeit im Höhenströmungsfeld. Sie zeigt das charakteristische Höhenantizyklonenpaar über dem Ostpazifik, das mit gesteigerter Wellenbildung in der unteren Troposphäre und markant gehäufte Konvektivbewölkung über der Äquatorialregion verbunden ist. Weiter östlich schließen sich ausgedehnte Höhenwestwindfelder an, die zumindest mit der reduzierten niedertroposphärischen Wellenbildung und der retardierten Konvektionsaktivität im äquatorialen Bereich von Atlantik und östlichem Südamerika korrespondieren. Auffällig ist die betont wellenförmige Struktur der nordhemisphärischen Zirkulation bei kleiner Wellenlänge, während die südhemisphärische Höhenströmung polwärts von 20° S eher in langen flachen Wellen organisiert ist. Mit der zyklonalen Phase über Südamerika gelangen offensichtlich frontale Einflüsse weit äquatorwärts, wie es von Kousky (1979) generell beschrieben wird und hier an den im Randbereich des Datenfeldes gesteigerten HRC-Häufigkeiten zu erkennen ist. Ansonsten besteht eine klarere Korrespondenz der Konvektionsanomalien zu den niedertroposphärischen ZWI-Abweichungen, so neben dem tropischen Nordatlantik vor allem im Bereich Afrikas und des westlichen Indischen Ozeans.

Das letzte der hier gezeigten Höhenströmungsmuster (Hauptkomponente 1) erreicht seine

maximale Gewichtung im April 1974, also in einer Jahreszeit, die gegenüber dem El-Niño-Höhepunkt tendentiell entgegengesetzte HRC-Anomalieverteilungen zeigt. Sofort wird das kräftige antizyklonale Aktionszentrum im Südatlantik erkennbar, an dessen äquatorwärtiger Seite die auffälligen Positivanomalien bei Wellenbildung (ZWI) und Konvektionsaktivität (HRC) auftreten. Ansonsten herrschen bei eher flach mäandrierender Höhenströmung auf der Nordhemisphäre in den Tropen verbreitet schwache oder unzusammenhängende Windfelder vor, die in der Regel keine normal entwickelte Konvektionsaktivität zulassen. Lediglich über Afrika ist ein nicht übermächtiges Antizyklonenpaar ausgebildet, das allerdings auch keine Konvektionsbelebung auszulösen vermag; stattdessen zeigen die niedertroposphärischen ZWI-Werte großräumige Negativanomalien in diesem Bereich, die mit den gleichsinnigen HRC-Anomalien korrespondieren. Nicht immer müssen also hoch- und niedertroposphärische Verhältnisse in gleichartiger Weise aufeinander abgestimmt sein, wenngleich die vorgelegten Ergebnisse im allgemeinen eine gute Übereinstimmung zeigen.

5. Implikationen und Folgerungen

Der Aussagegehalt der erörterten Beispiele läßt sich in folgender Weise zusammenfassen und in weiterführende Fragestellungen einordnen:

a) auch außerhalb des pazifischen Großraums mit seinem markanten El-Niño-Phänomen existieren großräumige Klimaanomalien, die weitgespannte Bereiche in unterschiedlich kombinierter Weise betreffen. Von den hier gezeigten Beispielen aus dem zirkumatlantischen Bereich der Tropen, die sich auf jahreszeitliche Häufigkeitsanomalien hochreichender Bewölkung stützen, fällt nur eines (Frühjahr 1983) direkt mit einer Extremalphase der pazifischen Schwankung zusammen und zeigt die für El-Niño-Ereignisse typische Inversanomalie über Nordost-Brasilien und dem äquatorialen Atlantik (Caviedes 1988; Covey und Hastenrath 1978). Ansonsten ist ein Zusammenhang der Anomalieverteilungen mit der pazifischen Schwankung zumindest nicht unmittelbar zu erkennen, wenngleich die tendentiell entgegengesetzte Anomalieanordnung vom Frühjahr 1974 dezidierten Anti-El-

Niño-Verhältnissen im Nordwinter (Südsommer) des gleichen Jahres (Jacobeit 1989: 145f.) nachfolgt und das Frühjahr 1984 mit seiner markanten Konvektionsbelebung im zirkumatlantischen Raum gleichzeitig die Rückkehr vom vorjährigen El-Niño im Ostpazifik dokumentiert (Horel, Kousky und Kagano 1986). Trotz gewisser Gegenläufigkeiten zwischen Atlantik und Pazifik wird man jedoch auch die Klimaanomalien im hier betrachteten Großraum als ein eigenständiges Phänomen zu berücksichtigen haben. Neben diagnostischen Vervollständigungen signifikanter Anomalieverteilungsmuster wird dabei vor allem die Frage nach möglichen Gesetzmäßigkeiten ihres Auftretens und ihrer zeitlichen Abfolge von Bedeutung sein (Hastenrath 1985: 315).

b) Großräumige Klimaanomalien sind Ausdruck unterschiedlicher Zustandsformen der Atmosphäre oder des gesamten Klimasystems und lassen sich mit geeigneten Methoden in diesen maßgeblichen Bedingungsbeziehungen erfassen. Dabei ist in vorliegendem Kontext vor allem die Einbindung und Anordnung der konvektionsfördernden bzw. -beeinträchtigenden Zirkulationsmomente (z.B. Höhenost- bzw. -westwinde, Höhendivergenz- bzw. -konvergenzgebiete, antizyklonales Ausströmen bzw. zyklonales Einströmen) in einer spezifischen großräumigen Zirkulationsstruktur von Bedeutung, wie etwa das auf beiden Hemisphären weite äquatorwärtige Vordringen der subtropischen Höhenwestwinde (November 1974), die kräftige Ausbildung zahlreicher Höhenantizyklonen (Mai 1984), die Kombination von Antizyklonenpaar und unterschiedlich schwingenden Westwindbändern (Mai 1983) oder die verbreitete Schwächung der äquatornahen Höhenströmung bei gleichzeitiger Ausbildung eines dominanten Aktionszentrums (April 1974).

Neben den hier behandelten hoch- und niedertroposphärischen Strömungsverhältnissen sind natürlich bei vollständiger Betrachtung noch weitere zirkulationsrelevante Gegebenheiten zu berücksichtigen: etwa die Bodenluftdruckverteilung und ihre erdoberflächenströmungsbeeinflussenden Variabilitäten (Chu 1984; Hastenrath 1984) oder die Anomalieverteilungsmuster der Meeresoberflächentemperaturen (Lamb, Pepp-

ler und Hastenrath 1986; Ward, Brooks und Foland 1988), deren Stellenwert teilweise nur in einem rückkoppelnden Folgeeffekt atmosphärischer Veränderungen (Chung 1982), teilweise aber auch in diese ursächlich auslösenden Wirkungen gesehen wird (Markham und McLain 1977).

Die maßgebliche Bedeutung insbesondere der troposphärischen Höhenströmung (Tyson 1988) liegt jedoch darin, daß Schwankungen des Bodenluftdrucks und die dadurch bedingten erdoberflächennahen Umverteilungsprozesse Massenveränderungen in ganzen atmosphärischen Säulen widerspiegeln, für die der horizontale Massenzu- und -abfluß in der quasi-reibungsfreien Höhe ein wesentliches Moment ist (Hastenrath 1985: 316). Diese Massenumlagerungen in der Höhe sowie ihre Schwankungen und Anomalien hängen ab von der großräumigen Struktur und Dynamik der Höhenströmung, die damit ein wesentlicher Schlüssel zum Verständnis unserer Klimaanomalien werden.

c) Die weitergehende Bedeutung empirisch ermittelter Zirkulationsmuster, die mit großräumigen Klimaanomalien einhergehen, liegt in der Möglichkeit, die internen und externen Bedingungen ihres Auftretens zu untersuchen und damit zu nachvollziehbaren Ursächlichkeiten zu gelangen. Begünstigt wird diese Intention durch die empirisch belegbare Eigenschaft der Atmosphäre, auf unterschiedlichen Zeitskalen (von Tagen bis zu Dekaden) immer wieder ähnliche Zustandsformen auszubilden (Tyson 1988); Erkenntnisse über ihre Auftretensbedingungen können also auch aus zeitdimensional sehr verschieden angelegten Untersuchungen zusammenlaufen.

Interne Bedingungen sind dabei solche innerhalb der Atmosphäre oder des Klimasystems, die die Annahme einer bestimmten Zustandsform im zyklischen Phasenablauf begünstigen (z.B. gehäufte westpazifische Wirbelstürme am Beginn einer Ereigniskette bis zu einem El-Niño). Externe Bedingungen dagegen sind solche, die von außerhalb des Klimasystems zustandsbeeinflussend modifiziert werden (z.B. vulkanstaubbedingte Veränderungen meridionaler Temperaturgradienten mit Auswirkungen auf die Auftrittshäufigkeit bestimmter Zirkulationsformen).

In diesem Zusammenhang gewinnen auch menschliche Eingriffe ins Klimasystem potentielle Bedeutsamkeit. Zwar läßt sich gerade dieser zirkulationsbezogene Aspekt nur schwer quantifizieren, aber wie an anderer Stelle (Jacobit 1990) zu zeigen versucht worden ist, könnten bestimmte Eingriffe wie großflächige Regenwaldrodungen und randtropische Überweidungen zu einer Modifikation troposphärischer Temperaturgradienten und einer dadurch bedingten Bevorzugung bestimmter Anomalievarianten führen. Die übergeordneten Bedingungs-zusammenhänge sowohl der hier gezeigten Beispiele als auch der meisten anderen großräumigen Anomaliephänomene sind jedoch noch nicht hinreichend geklärt und eröffnen auch der Geographie ein breites und vor allem aktuell bedeutungsvolles Betätigungsfeld.

6. Literatur

- Caviedes, C.N.* 1988: The effects of ENSO events in some key regions of the South American continent. - In: *Gregory, S.*: Recent Climatic Change. - London/New York: 252-266
- Chu, P.-S.* 1984: Time and space variability of rainfall and surface circulation in the Northeast Brazil-tropical Atlantic sector. - *Journal of the Meteorological Society of Japan* **26**: 363-369
- Chung, J.C.* 1982: Correlations between the tropical Atlantic trade winds and rainfall in northeastern Brazil. - *Journal of Climatology* **2**: 35-46
- Covey, D.L.* and *S. Hastenrath* 1978: The Pacific El Niño phenomenon and the Atlantic circulation. - *Monthly Weather Review* **106**: 1280-1287
- Garcia, O.* 1981: A comparison of two satellite rainfall estimates for GATE. - *Journal of Applied Meteorology* **20**: 430-438
- Gray, T.I., Jr.* and *P.F. Clapp* 1978: An interaction between low- and high-latitude cloud bands recorded on GOES-1 imagery. - *Bulletin of the American Meteorological Society* **59**: 808-809
- Hasselmann, K.* und *K. Herterich* 1977: Klima und Klimavorhersage. - *Annalen der Meteorologie N.F.* **12**: 42-46
- Hastenrath, S.* 1969: A study of the atmospheric circulation between equator and 60°N during the winter and summer seasons. - *Pure and Applied Geophysics* **77**: 207-225
- Hastenrath, S.* 1984: Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. - *Monthly Weather Review* **112**: 1097-1107
- Hastenrath, S.* 1985: Climate and Circulation of the Tropics. - Dordrecht
- Horel, J.D., V.E. Kousky* and *M.T. Kagano* 1986: Atmospheric conditions in the Atlantic sector during 1983 and 1984. - *Nature* **322**: 248-251
- Jacobit, J.* 1989: Zirkulationsdynamische Analyse rezenter Konvektions- und Niederschlagsanomalien in den Tropen. - *Augsburger Geographische Hefte* **9**
- Jacobit, J.* 1990: Climatic Impacts of Tropical Land-Use Practices. - In: *Tropical Ecosystems - System Characteristics, Utilization Patterns, Destruction, Conservation Concepts.* - Saarbrücken (im Druck)
- Kousky, V.E.* 1979: Frontal influences on Northeast Brazil. - *Monthly Weather Review* **107**: 1140-1153
- Lamb, P.J., R.A. Pepler* and *S. Hastenrath* 1986: Interannual variability in the tropical Atlantic. - *Nature* **322**: 238-240
- Markham, C.G.* and *D.R. McLain* 1977: Sea surface temperature related to rain in Cearà, Northeastern Brazil. - *Nature* **265**: 320-323
- Martin, D.W.* and *M.R. Howland* 1986: Grid history: a geostationary satellite technique for estimating daily rainfall in the tropics. - *Journal of Climate and Applied Meteorology* **25**: 184-195
- Rao, M.S.V.* 1984: Retrieval of worldwide precipitation and allied parameters from satellite microwave observations. - *Advances in Geophysics* **26**: 237-336
- Reed, R.J.* 1978: The structure and behaviour of easterly waves over West Africa and the Atlantic. - In: *Shaw, D.B.* (ed.): *Meteorology over the Tropical Oceans.* - Bracknell: 57-72
- Richards, F.* and *P. Arkin* 1981: On the relationship between satellite-observed cloud cover and precipitation. - *Monthly Weather Review* **109**: 1081-1093
- Riehl, H.* 1979: Climate and weather in the tropics. - London/New York/San Francisco
- Tyson, P.D.* 1988: Synoptic circulation types and climatic variation over southern Africa. - In: *Gregory, S.* (ed.): *Recent Climatic Change.* - London/New York: 202-214
- Ward, M.N., S. Brooks* and *C.K. Folland* 1988: Predictability of seasonal rainfall in the northern Nordeste region of Brazil. - In: *Gregory, S.* (ed.): *Recent Climatic Change.* - London/New York: 237-251
- Yarnal, B.* 1985: Extratropical teleconnections with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events. - *Progress in Physical Geography* **9**: 315-352
- Yarnal, B.* and *G. Kiladis* 1985: Tropical teleconnections associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events. - *Progress in Physical Geography* **9**: 524-558