

Kopplungen im Klimasystem: Benguela Niños als Beispiel für Atmosphäre-Ozean-Kopplungen

Joachim Rathmann¹

Zusammenfassung

Kopplungen im Klimasystem werden am Beispiel von Atmosphäre-Ozean-Kopplungen dargestellt. Dazu wird ein regionales Beispiel ausgewählt: Warmwasserereignisse im südöstlichen Atlantik, sog. Benguela (El) Niños, spielen eine große Rolle für die Ökologie, die Fischereiwirtschaft und generell den Küstenraum Namibias und Südangolas. Während eines Benguela Niños treten – analog zu den Auswirkungen eines pazifischen El Niños – in Küstennähe starke Niederschläge und Überschwemmungen auf während im Benguelastrom ein dramatisches Fischsterben einsetzt.

Erst ein umfassendes Verständnis für die Entstehung von Warmwasserereignissen im Benguelastrom ermöglicht es abzuschätzen, welche Auswirkungen eine globale Temperaturzunahme auf das südwestafrikanische Küstenökosystem und damit unmittelbar auf die Volkswirtschaft von Südafrika, Namibia und Angola hat. Damit werden Mensch-Umwelt-Kopplungen offensichtlich. Abschließend werden Kritikpunkte an weit verbreiteten konstruktivistischen Positionen bezüglich naturwissenschaftlicher Forschung angeführt.

1. Einleitung

Warmwasserereignisse im südöstlichen Atlantik haben einen großen Einfluss auf den gesamten Küstenraum Namibias und Südangolas. Warmwasseranomalien im ansonsten kalten Benguelastrom werden als Benguela Niño bezeichnet und haben – analog zu den Auswirkungen eines pazifischen El Niños - in Küstennähe starke Niederschläge und Überschwemmungen zur Folge, während im Benguelastrom ein dramatisches Fischsterben einsetzt. Einen nennenswerten Impact auf das Ökosystem haben dabei die sog. Harmful Algal Blooms (HAB), die in diesem Zusammenhang auftreten können. Die fortschreitende Algenvermehrung - hier sind insbesondere Rotalgen anzuführen (ausführlich dazu: SMAYDA, 2000, S. 221, Tab. 1) - unterstützt durch Warmwasserzufuhr nach verstärktem Auftrieb, kann so stark sein, dass eine rötliche Verfärbung des oberflächennahen Wassers eintritt, sog. rote Tiden (red tides). Einige Spezies können sich toxisch auf ihre Umgebung auswirken und dabei zu einem Fischsterben führen oder über Aerosoltransport die menschliche Gesundheit beeinträchtigen.

Daneben sind weitere wirtschaftliche Einbußen hinsichtlich des Tourismus anzuführen, da große

¹Dr. Joachim RATHMANN, Universität Augsburg, Geographisches Institut, Lehrstuhl für Physische Geographie und Quantitative Methoden, Universitätsstrasse 10, 86135 Augsburg:
e-mail: joachim.rathmann@geo.uni-augsburg.de

Strandabschnitte mit verendeten Fischen bedeckt sein können (SMAYDA, 2000). Diese toxischen Algenblüten haben in den letzten Dekaden weltweit erheblich an Bedeutung gewonnen. Teilweise ist dies durch natürliche Änderungen der Ökosysteme, teilweise aber auch durch anthropogene Eingriffe, insbesondere durch Nährstoffzufuhr, bedingt. Bisher ist allerdings noch unklar, inwieweit das Auftreten von HABs an Benguela Niños gekoppelt sind (ARNTZ et al., 2006).

Aus Untersuchungen zum Niederschlag im südlichen Afrika ist eine hohe raum-zeitliche Variabilität, aber kein statistisch signifikanter langfristiger Trend erkennbar (HULME, 1992; RATHMANN, 2009). Allerdings wird für die letzten Dekaden ein leichter Niederschlagsrückgang deutlich (BECK & GRIESER, 2005). Ein Teil der hohen Niederschlagsvariabilität mit ausgeprägten Extremereignissen, wie Dürren und Überschwemmungen, lässt sich über Einflüsse der Meeresoberflächentemperaturen auf die Niederschläge im südlichen Afrika erklären (RATHMANN & JACOBET, 2003, 2009). Denn gerade im Kontext globaler Klimaänderungen und der anthropogen induzierten Konzentrationszunahme atmosphärischer Treibhausgase sind die Ozeane als fundamentaler Bestandteil des Klimasystems in jüngster Zeit verstärkt in den Blickpunkt der Forschung gerückt. Die markanten Warmwasserereignisse im zentralen und östlichen Äquatorial-Pazifik sind Gegenstand zahlloser Studien gewesen, so dass die dortigen Kopplungsmechanismen von Atmosphäre und Ozean inzwischen auch in Klimamodellen zuverlässig nachgezeichnet werden können. Aber im Gegensatz zum pazifischen El Niño, der relativ gut modelliert und prognostiziert werden kann, ist die Vorhersagbarkeit von klimatisch-ozeanischen Anomalien im südöstlichen Atlantik mit bisherigen Klimamodellen noch sehr gering (REASON et al., 2006b, HUANG & HU, 2007). Eine wesentliche Ursache dafür liegt in einem noch unzureichenden Prozessverständnis der Entstehung dortiger Warmwasserereignisse. Bislang wurden derartige Benguela Niños nahezu ausschließlich anhand detaillierter Fallstudien aus den letzten Dekaden untersucht.

Der kalte Benguelastrom erstreckt sich von der Südspitze Afrikas bei 35°S entlang der 2300 km langen Küste Südafrikas, Namibias und Angolas bis an die Angola-Benguela Front bei etwa 15-19°S. Einzigartig am Benguela Strom ist, dass er sowohl pol- als auch äquatorwärts von warmen Meeresströmungen (Agulhas-, Äquatorialstrom) begrenzt wird. Dies unterscheidet ihn von den anderen kalten Meeresströmen an den kontinentalen Westseiten (ausführlich dazu: SHANNON & NELSON, 1996). Als Hauptantriebskraft der Strömung und als Ursache des Auftriebs der Tiefenwässer (upwelling) müssen die südöstlichen Passatwinde angesprochen werden. Die Winde bewegen sich antizyklonal und werden durch die quasi-stationäre südatlantische Hochdruckzelle und das kontinentale Tief gesteuert. Kurzfristige Variabilität der Meeresoberflächentemperaturen wird durch ostwärts ziehende Zyklonen verursacht, die einen windinduzierten Auftrieb unterbinden. Die kalten Auftriebswässer bilden sich verstärkt im Südfrühling und Südsommer, wenn die Passate im südlichen Benguelastrom beständig wehen. Die winterliche Nordverlagerung bringt den südlichen Benguelastrom zunehmend unter den Einfluss von Westwinden, die eine Ausbildung von Auftriebswässern nicht mehr forcieren. Ein Großteil der Wassermassen des Benguelastromes kommt aus der Südatlantikströmung, kleinere aus dem Agulhasstrom und dem subantarktischen Oberflächenwasser (BOYER et al., 2000). Als Folge des ablandigen Ekman-Transportes entsteht eine erniedrigte Meeresoberfläche entlang der Küste, daraus resultiert ein Druckgradient zur Küste hin, der einen Wasserzustrom speist, wodurch der Auftrieb verstärkt wird.

Nachdem Anfang des 20. Jahrhunderts Warmwassereinbrüche, El Niños, im Pazifik beschrieben wurden, postulierte Schott einen ähnlichen Mechanismus für den Atlantik (1931, S. 249). Eine vergleichbare Beckenstruktur und Küstenlinien mit Auftriebswässern veranlassten ihn zu Analogieschlüssen. Neben dem äquatorialen Atlantik Niño wurde inzwischen von zahlreichen Warmwasserereignissen im Benguelastrom berichtet. Starke Warmwassereinbrüche erfolgten 1934, 1950, 1963,

1984 und 1995. Einige dieser Ereignisse wurden von Shannon et al. (1986) als „Benguela Niño“ bezeichnet. Beim Auftreten von extrem niedrigen SST²s spricht man (ebenfalls in Analogie zur pazifischen Terminologie) von Benguela Niñas (FLORENCHIE et al. 2004). SHANNON und TAUNTON-CLARK (1989) (zitiert in Shannon et al. 1996, S. 175f.) erwähnen Benguela Niños in den Jahren 1934, 1949, 1963, 1984 sowie wahrscheinlich um 1910, Mitte der 1920er Jahre und zwischen 1972 und 1974. Ein weiteres Warmwasserereignis fand 1995 statt: Damals rückten die warmen Wassermassen aus dem Angolastrom polwärts vor. Es konnte bei 17°S eine positive Temperaturanomalie von 5K beobachtet werden (FLORENCHIE et al. 2003, 2004). Der Benguela Niño von 1995 wird ausführlich von GAMMELSRØD et al. (1998) auf der Basis von Satellitendaten untersucht, derjenige von 2001 ist bei ROUAULT et al. (2003) beschrieben.

In einer grundlegenden Arbeit zeigten SHANNON et al. (1986) anhand der Benguela Niños von 1934, 1963 und 1984, dass für die Genese eine starke Advektion äquatorialer und tropischer Wassermassen nach Osten und Süden entlang der Küste Namibias erfolgen muss. Insbesondere die plötzliche Abschwächung des Windstress' über dem äquatorialen Westatlantik vor der Küste Brasiliens ist eine notwendige Voraussetzung, damit sich eine große Menge warmer Wassermassen im tropischen Atlantik nach Osten verlagern kann. An die zunehmenden SSTs sind wiederum Änderungen der darüber anschließenden Atmosphäre gebunden. Entscheidend für die Ausbildung von Warmwasserereignissen ist also weniger der unterdrückte Auftrieb kalter Tiefenwässer, als vielmehr die Zufuhr warmer, tropischer Wassermassen aus dem Nordwesten. HIRST und HASTENRATH (1983) postulieren ein Abschwächen der tropischen Ostwinde im westlichen Atlantik. Sie zeigen, dass ein abgeschwächter Windstress über dem westlichen äquatorialen Atlantik für 23% der SST-Variabilität vor der Küste Angolas verantwortlich ist, während lokale Windänderungen nur 9% der Varianz erklären. In ihrer Studie zu Niederschlagsanomalien an der angolanischen Küste bilden sie zunächst einen Niederschlagsindex aus den Daten von drei Stationen. Daraus lassen sich für den Zeitraum 1940 bis 1975 sechs anomale Feuchtjahre ausmachen (1948, 1953, 1954, 1958, 1964 und 1972). Zugehörige Feld-Kompositen zeigen hohe SST-Anomalien im gesamten tropischen Atlantik, während der Luftdruck großräumig über dem südlichen Atlantik abnimmt. Dass der Hauptantriebsmechanismus für einen Benguela Niño in Änderungen der Passatwinde vor der Küste Brasiliens zu suchen ist, können FLORENCHIE et al. (2003) mit den Ergebnissen aus einer modellgestützten Studie zeigen. Anomalien in den Passaten des westlichen und zentralen äquatorialen Beckens lösen ostwärts wandernde Kelvinwellen aus, die Temperaturanomalien des Meerwassers zur Folge haben (REASON et al. 2006a). Erreichen sie die Küste Afrikas, wandern sie südwärts und tragen die SST-Anomalien in die Angola Benguela Front, wo die Thermokline die Oberfläche erreicht. SST-Anomalien zeigen sich an der Oberfläche ein bis zwei Monate nach dem Auftreten von Temperaturanomalien im Bereich der Thermokline.

Aufgrund einer besseren Datenverfügbarkeit basieren zahlreiche Studien auf Daten der letzten 30 bis 50 Jahre (vgl. REASON et al., 2006b, SHILLINGTON et al., 2006). Untersuchungen über einen längeren Zeitraum liegen von Hagen et al. (2005) vor. Dabei werden Klimaänderungen im südöstlichen Atlantik anhand des von FEISTEL (2003, zitiert in HAGEN et al., 2005) entwickelten St.-Helena-Klima-Index (HIX) für 1893 bis 2001 beschrieben. Mittels dieses Index' lässt sich ein verstärkter Auftrieb kalter Tiefenwässer im Benguelastrom während des Südwinters (Juli bis September) aufspüren. Hagen et al. (2005) sprechen auf der Basis ihres Index' die Jahre 1984, 1993, 1996/97, und 1999 als solche mit Benguela Niños an. Dagegen gab es einen verstärkten Auftrieb kalten Tiefenwassers 1982, 1985, 1990 und 1992.

Die Kopplungen der atlantischen SST-Variabilitätsmuster mit den pazifischen El Niños sind in vielen Details noch unklar. Benguela Niños können der Reifephase eines El Niño folgen, wie dies 1984 der

² SST: Sea Surface Temperature, Meeresoberflächentemperatur

Fall war. Andere Benguela Warmwasserereignisse, 1934 oder 1963 (von SHANNON et al., 1986 ausführlich beschrieben), hatten keinen pazifischen El Niño im Vorfeld aber entsprechende Auswirkungen auf die Niederschläge. Insgesamt lassen sich aber signifikante ENSO-Signale für große Räume des südlichen Atlantiks aufzeigen (COLBERG et al., 2004, REASON et al., 2006b).

Im Folgenden werden statistische Analysen zur SST- und Niederschlagsvariabilität im südlichen Afrika für den Zeitraum 1901-2003 auf der Basis globaler Gitternetzdaten vorgestellt. Auf eine knappe Beschreibung der zugrunde liegenden Datenbasis in Abschnitt 2 werden die verwendeten Methoden kurz beschrieben (Abschnitt 3), ausgewählte Ergebnisse werden in Abschnitt 4 vorgestellt und abschließend zusammenfassend diskutiert.

2. Datengrundlage

Entscheidend für die Aussagekraft der Ergebnisse einer jeden empirischen Untersuchung ist letztlich die Qualität der Datenbasis. Bei der Arbeit mit historischen Klimadaten aus dünn besiedelten Regionen der Erde treten zahlreiche Probleme auf. Zum einen sind Messdaten in nur sehr geringem Umfang erhoben worden und zum anderen weisen diese meist noch erhebliche Inhomogenitäten auf; das heißt diese Daten zeigen Trends oder Sprünge im Mittelwert oder in der Varianz, die unterschiedliche Ursachen haben können. Die Ursachen für die Inhomogenitäten liegen meist in Stationsverlegungen, Änderungen der Stationsumgebung oder Instrumenten- bzw. Beobachterwechsel. Dies hat zur Konsequenz, dass eine Analyse mit klimatischen „Rohdaten“ praktisch unmöglich ist. Daher müssen die benötigten Daten erst aufwendig homogenisiert werden. Leider liegen bisher für den Untersuchungsraum und die entsprechende Untersuchungsperiode keine flächendeckenden homogenen Stationsdaten der relevanten Klimaparameter vor, weshalb in dieser Studie auf global vorliegende Gitternetzdaten zurück gegriffen wird. Gitternetzdaten haben gegenüber Stationsdaten den Vorteil, dass sie die ganze räumliche und zeitliche Auflösung einheitlich repräsentieren. Für die Temperatur und den Niederschlag konnte eine aktualisierte und korrigierte Version (vgl. ÖSTERLE et al., 2003) der CRU05-Daten von der Climatic Research Unit (CRU) der University of East Anglia in Norwich benutzt werden. Diese Daten liegen global in einer räumlichen Auflösung von $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ für die Landoberflächen mit Ausnahme der Antarktis vor. Der Datensatz beginnt 1901 und setzt sich monatlich bis 1998 fort (ausführlich dazu: NEW et al., 1999, 2000). Den nachfolgenden Untersuchungen liegen damit für das südhemisphärische Afrika jeweils 3530 Gitterboxdaten pro Monat für Temperatur und Niederschlag zugrunde.

Den vorgestellten Analysen zu Meeresoberflächentemperaturen liegt der HadISST1.1-Datensatz (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set) zugrunde. Die Daten liegen monatlich in einem Gitternetz von 1° Länge und 1° geographischer Breite vor. Dieser Datensatz basiert methodisch auf einer "Reduced Space Optimal Interpolation (RSOI)" Technik (ausführlich dazu: Rayner et al. 2003). Als Datengrundlage dienten Messdaten aus den COADS- (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) und MOHSST- (Met Office Historical Sea-Surface Temperature) Datensätzen.

Der globale Luftdruckdatensatz Global Mean Sea Level Pressure (GMSLP) liegt in einer räumlichen Auflösung von $5^\circ \times 5^\circ$ monatlich für den Zeitraum 1871 bis 1994 vor. Dieser Datensatz wurde in Zusammenarbeit des Meteorological Office von Großbritannien, dem Hadley Centre, CSIRO (Australien) und der NIWA (Neuseeland) entwickelt. Darauf aufbauend wurde der HadSLP-Datensatz erstellt, der bis zum Jahr 1998 reicht. Inzwischen liegt eine in der zeitlichen Dimension deutlich erweiterte Version HadSLP2 vor. Dieser Datensatz umfasst den Zeitraum 1850 bis 2004 und wird von ALLAN und ANSELL (2006) ausführlich beschrieben. Jede terrestrische Zeitreihe, die Eingang in den Datensatz gefunden hat, wurde qualitätskontrolliert - ebenso die marinen Beobachtungsdaten. Anschließend wurden die Luftdruckdaten räumlich mit der Reduced-Space Optimal Interpolation Methode zum Gitterfeld interpoliert.

3. Methoden

Die Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA) ist eine multivariate statistische Methode, die eine Dimensionsreduktion einer großen Ausgangsdatenmenge ermöglicht. Eine Vielzahl von Variablen soll durch eine wesentlich geringere Anzahl von unkorrelierten Faktoren (in diesem Fall: Hauptkomponenten) repräsentiert werden, die einen Großteil der Varianz der Ausgangsdaten erklären. Dabei wird eine Beziehung zwischen den Originalvariablen und den konstruierten abstrakten Größen, den Hauptkomponenten (Principal Components, PCs), hergestellt. Die Hauptkomponentenanalyse findet seit 30 Jahren in zahlreichen Arbeiten der Klimaforschung Anwendung und hat sich als eine multivariate Methode zur Analyse der atmosphärischen Zirkulation etabliert (vgl. SCHÖNWIESE, 2000, Kap. 12, S. 204ff.). Zunächst wird eine Korrelationsmatrix aller Eingangsvariablen berechnet. Wahlweise ist dies auch über eine Kovarianzmatrix möglich. Die Unterschiede beider Ansätze werden bei Washington und TODD (1999) ausführlich diskutiert. In einem weiteren Schritt wird aus den Ausgangsvariablen eine Gruppe gebildet, deren Variablen untereinander hoch korrelieren. Damit soll sichergestellt werden, dass die Variablen in ähnlicher Weise variieren und daher den gleichen Sachverhalt unterschiedlich darstellen. Die einzelnen Hauptkomponenten sollen nicht miteinander korrelieren und stochastisch unabhängig voneinander sein, d.h. orthogonal zueinander stehen. Die resultierenden Hauptkomponenten repräsentieren dann in verdichteter Form die wesentlichen Charakteristika der Ausgangsvariablen. Dabei werden Muster, welche deren räumliche (bzw. zeitliche) Varianz am besten wiedergeben, dargestellt.

Als Variablen werden zunächst die Bodenluftdruckdaten der jeweiligen Monate herangezogen. Die Gitterpunkte (bzw. bei Temperatur und Niederschlag Gitterboxen) bilden dann die Ereignisfälle, man spricht vom analytischen t-Modus (t=„time“) des Verfahrens. Werden dagegen die Raumeinheiten (die Gitterpunkte, -boxen) als Variablen gewählt und die Zeitreihe des Klimaelementes als Ereignisfälle, spricht man von einer s-modalen (s=„space“) Analyse. Sie bildet Variationszentren ab, d.h. Repräsentanten von Raumeinheiten, die eine Zeitreihe gut repräsentieren.

Meist werden Hauptkomponentenanalysen mit einem zusätzlichen Verfahren erweitert, um die inhaltliche Interpretierbarkeit einzelner Hauptkomponenten zu verbessern. Es wird eine sog. „Rotation“ durchgeführt. Das Ziel der Rotation ist es (im z.B. s-modalen Fall), ein klares Muster der Ladungen zu erhalten, d.h. Hauptkomponenten, die für einige Variablen hohe Ladungen, für andere wiederum niedrige Ladungen aufweisen (MESTAS-NUÑEZ, 2000). Bei einer Rotation bleibt der Gesamtvarianzerklärungsanteil der rotierten Hauptkomponenten erhalten. Allerdings ändert sich die Verteilung der einzelnen Varianzerklärungsanteile auf die einzelnen Hauptkomponenten dahingehend, dass den ersten PCs weniger und den folgenden mehr Bedeutung zukommt. Eine rotierte Analyse ist insgesamt gegenüber leichten Veränderungen der Eingangsdaten robuster und kann eindeutiger physikalisch interpretiert werden, da jede rotierte Hauptkomponente eine Gruppe hoch korrelierter Variablen repräsentiert. Damit lassen sich die rotierten Faktoren gut zu einer Regionalisierung heranziehen, wobei eine Region in eine begrenzte Anzahl homogener Subregionen, die miteinander nicht korreliert sind, eingeteilt wird. Am weitesten verbreitet ist die auch in dieser Arbeit verwendete orthogonale Varimax-Rotation der Hauptkomponenten.

Die Bestimmung der Anzahl an Hauptkomponenten (Extraktion) ist ein schwieriges Feld. Das Ziel ist es, eine möglichst geringe Anzahl mit einem möglichst hohen Varianzerklärungsanteil zu erhalten. Schließlich sollen die ausgewählten Hauptkomponenten auch immer im Hinblick auf die klimatologische Interpretation sinnvolle Muster ergeben. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, das zugrunde liegende Extraktionskriterium zu objektivieren, schließlich beeinflusst es doch erkennbar die Ergebnisse der jeweiligen Analyse (siehe z. B. BECK, 2000). Die Bestimmung erfolgt aber erst nach einer Varimax-Rotation, da diese die Varianzanteile der einzelnen Hauptkomponenten etwas ausgleicht. Es wurde bei der Extraktion der PCs ein Dominanzkriterium, erweitert um die Ladung an den Gitterpunkten mit Beträgen $\geq 0,7$ bzw. $\geq 0,5$ beim Niederschlag, herangezogen. Das Dominanzkriterium besteht darin, die Hauptkomponenten auszuwählen, die mindestens auf eine Variable maximal laden (d.h. die im Vergleich zu den übrigen Hauptkomponenten höchste Ladung aufweisen) und standardisiert über 1 liegen (vgl. JACOBET, 1993). Dies ist insofern für die s-modale

Analyse von Bedeutung, weil damit jede extrahierte Hauptkomponente noch mindestens einen Gitterpunkt auf der Karte als „Variationszentrum“ repräsentiert. Dadurch soll sichergestellt werden, dass nur aussagekräftige Hauptkomponenten bestimmt werden.

Für die vorliegende Arbeit wurden einzelmonatliche s-modale Hauptkomponentenanalysen mit den Niederschlags-, Temperatur-, Luftdruckdaten und den Daten zur Meeresoberflächentemperatur berechnet. Die Ergebnisse der s-modalen Analysen zeigen die Varianz der Elemente der Gitterpunkte über den Zeitraum von 103 Jahren. Dabei sind es die Ladungen, die sich als „Variationszentren“ interpretieren lassen. In diesen dominiert, verglichen mit dem gesamten Untersuchungsraum, ein bestimmter zeitlicher Variabilitätsmodus. Die Bildung solcher Variationszentren kann als eine Art Regionalisierung betrachtet werden. Denn die räumliche Darstellung der höheren Ladungen der Ladungsmatrizen, die aus Korrelationskoeffizienten zwischen Originalvariablen und Hauptkomponenten bestehen, ermöglicht die Lokalisation des Kerns und des Haupteinzugsgebietes eines Variationszentrums. Die Lage dieser Variationszentren kann entweder die stärksten Druckgradienten oder die höchsten positiven bzw. negativen Anomalien anzeigen. Jeder Punkt des Untersuchungsgebietes wird dabei von einem oder mehreren Variationszentren beeinflusst.

Kanonische Korrelationsanalyse

Die Kanonische Korrelationsanalyse (CCA, Canonical Correlation Analysis) wird spätestens seit den richtungweisenden Arbeiten von Nicholls (1987) sowie Barnett und PREISENDORFER (1987) intensiv in der statistisch orientierten Klimaforschung eingesetzt. - Die CCA bestimmt einen multivariaten Zusammenhang zwischen zwei oder mehr Variablengruppen. Eine ausführliche Darstellung der Methode findet man etwa in von Storch und ZWIERS (1999, Kap. 14) und etwas knapp gehalten auch bei SCHÖNWIESE (2000). Die kanonische Korrelation ermöglicht die Erfassung mehrerer linearer Zusammenhänge zwischen den gewählten Variablengruppen bzw. den entsprechenden Hauptkomponenten. Als Ergebnis einer CCA erhält man für die beiden analysierten Variablengruppen kanonische Musterpaare, die sowohl wesentliche Varianzanteile in der entsprechenden Variablengruppe erklären als auch den jeweils maximal möglichen Zusammenhang zwischen den beiden Gruppen repräsentieren. Das zu einem kanonischen Variablenpaar gehörende kanonische Ladungsmusterpaar entsteht durch die räumliche Darstellung der Korrelationskoeffizienten. Die Ladungsmatrix enthält jedoch lediglich die Zusammenhänge zwischen der kanonischen Variablen und den Hauptkomponenten der entsprechenden Klimaelemente. Um eine volle räumliche Auflösung der Daten zu erhalten, wird eine Rücktransformation durch eine Korrelation der standardisierten originalen Variablenfelder X und Y mit den Werten der kanonischen Variablen vorgenommen. Im Ergebnis erhält man für alle originalen Gitterpunkte bzw. Gitterboxen je einen Korrelationskoeffizienten, die in räumlicher Darstellung das Ladungsmuster ergeben. Daraus lässt sich dann der räumliche Zusammenhang der Variabilität der betrachteten Klimaelemente entnehmen. Jeder Gitterpunkt der Variablengruppe X ist unabhängig von seiner räumlichen Lage mit jedem Gitterpunkt der Variablengruppe Y innerhalb eines Musterpaares korreliert.

Die CCAs wurden in der vorliegenden Arbeit nicht mit den Originalvariablen selbst berechnet, sondern mit den Zeitkoeffizienten (Scores) der Varimax-rotierten s-modalen PCAs, die auf die originalen Gitterfelder aller zur Verfügung stehender Klimaelemente angewendet wurden. Dadurch wird erreicht, dass ein statistisch unabhängiger Datensatz in die CCA eingeht, gleichzeitig wird die Information verdichtet und das Hintergrundrauschen in den Daten unterdrückt.

4. Ergebnisse

Die aus der bisherigen Forschung bekannten SST- und SLP-Muster lassen sich beispielhaft für die Benguela Niños von 1984 und 1995 verdeutlichen. In Abbildung 1 sind Anomalien des bodennahen Luftdrucks und des Niederschlages für die Monate Februar und April der Jahre 1984 und 1995 gegenübergestellt. Daraus wird ein abnehmender Luftdruck im Bereich des St. Helena Hochs (im Februar) ersichtlich. Dies deutet auf das Abschwächen der Passatzirkulation in diesem Raum hin.

Gleichzeitig sind anomal hohe Niederschläge entlang der Ostküste des südlichen Afrikas erkennbar. Allerdings sind diese zeitlich sehr variabel, so dass 1984 erst im April erhöhte Niederschläge auftraten, im Jahr 1995 schon im Februar.

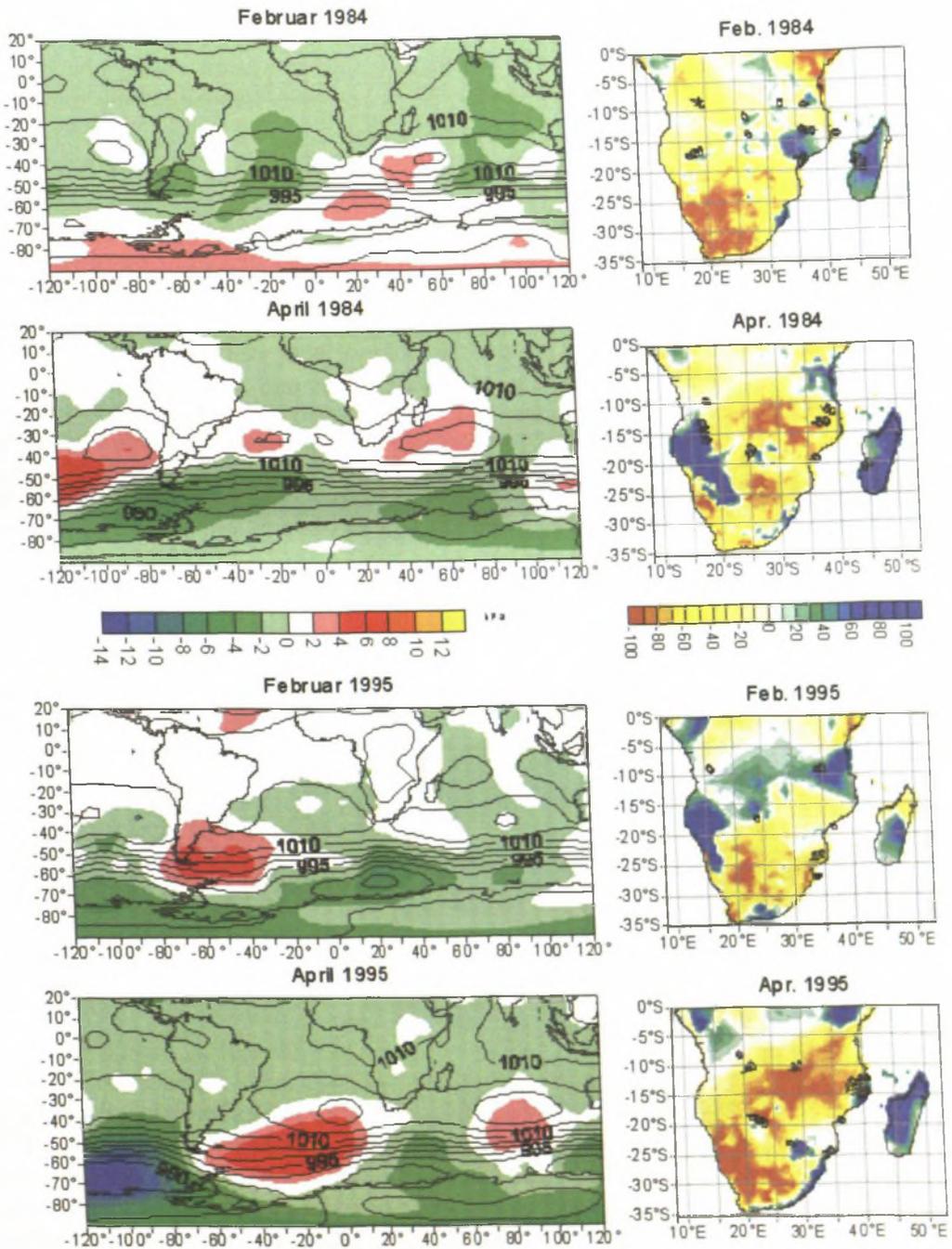


Abb. 1: SLP- und Niederschlaganomalien (in Abweichungen vom Mittelwert 1961-1990) für den Februar (erste und dritte Reihe) und April (zweite und vierte Reihe) 1984 (linke Abb.) und 1995 (rechte Abbildungen). Zu den Luftdruckanomalien ist noch ein SLP-Feld des entsprechenden Monats angegeben.

Die hohe zeitliche Variabilität des Benguela Niño Systems verdeutlichen auch die Zeitkoeffizienten der s-modal berechneten Hauptkomponenten, mit Ladungsschwerpunkt im Bereich des Benguelastromes (nicht dargestellt). Für die weiteren Untersuchungen der Benguela Warmwasserereignisse wurde zunächst ein SST-Gebietsindex (15°S-20°S, 10°E-15°E, „Benguela Niño Index“) gebildet. Ein

alternativer Index (10°S-20°S, 5°E-15°E) zeigt keine nennenswerten Unterschiede im Ergebnis. Aus der standardisierten Zeitreihe wurden Einzelfälle mit maximalen Werten größer als 1 zur Bildung von Kompositen herangezogen. Die Berechnung von Kompositen stellt eine einfache Methode dar, um bestimmte Signale einer Zeitreihe zu verdeutlichen. Dazu werden nach entsprechenden Kriterien ausgewählte Zeitreihenabschnitte zusammengefasst. Es wird unterstellt, dass die Mittelung mehrerer ausgewählter Zeitreihenausschnitte bestimmte Signale verstärkt herausstellen, gleichzeitig aber Rauschen unterdrücken kann. Dies geschieht hier auf der Basis eines Benguela Niño Index. Generell werden diese Zeitreihen jedoch stark vom positiven SST-Trend überlagert (vgl. RATHMANN, 2009). Dies hat zur Folge, dass die früheren Benguela Niños – wie beispielsweise das Ereignis von 1934 – nicht so deutlich in Erscheinung treten. Alternativ wurden die Analysen zusätzlich mit hochpassgefilterten Zeitreihen durchgeführt, um den langfristigen SST-Trend zu entfernen. Dabei zeigte sich allerdings, dass dann einige Warmwasserereignisse zu Beginn des Untersuchungszeitraumes auftreten, die in der Literatur als solche nicht belegt sind. Insgesamt lassen sich die dominanten Ereignisse von 1934, 1963, 1974, 1976, 1984 und 1995 klar darstellen: Erhöhte SSTs, stark überdurchschnittliche küstennahe Niederschläge und ein Nachlassen der Passatwinde über dem Atlantik werden deutlich (vgl. Abb. 2). Daher werden die Auftriebswässer abgeschwächt und von Norden können warme Wassermassen in den Benguelastrom einströmen.

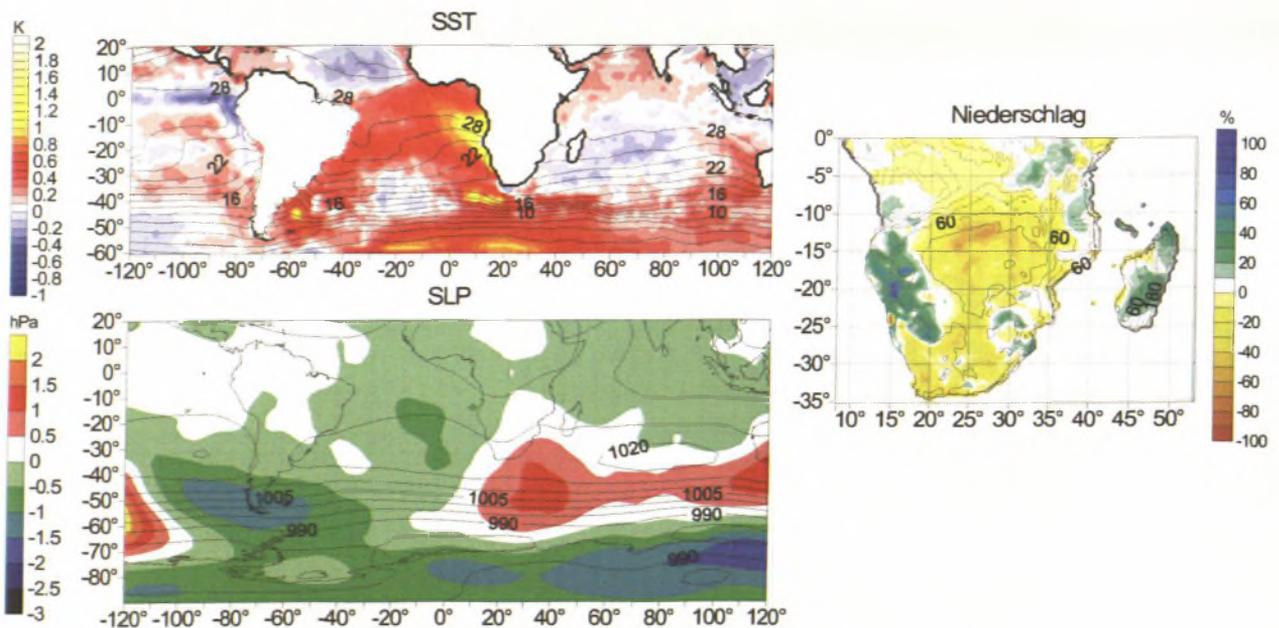


Abb. 2: April-Kompositen für SST, SLP und Niederschlag aus 11 Fällen für den Benguela Niño Index > 1 (in drei Folgemonaten), dargestellt in Isolinien. Abweichungen vom Mittelwert (1961-1990) sind farbig dargestellt.

5. Zusammenfassung - Kopplungen im Klimasystem

Es konnte gezeigt werden, dass jeder Benguela Niño bezüglich der Niederschlagsverteilung eine eigene Charakteristik aufweist (vgl. Abb. 1), so dass auf der Basis weiterführender kanonischer Korrelationsanalysen keine aussagekräftigen Kopplungsmuster des Niederschlages mit den SSTs des südöstlichen Atlantischen Ozean erzielt werden konnten. Einzelmonatliche gekoppelte Musterpaar können jeweils nur einige Benguela Niños erfassen. So zeigt sich im dritten Musterpaar für den September, dargestellt in Abbildung 3, das Ereignis von 1934, 1963 und 1984 sehr deutlich, jene von 1995 und 2001 jedoch im ersten gekoppelten Musterpaar (nicht dargestellt). Der Verlauf der Zeitkoeffizienten in Abbildung 4 verdeutlicht diese Dominanz der einzelnen Extremereignisse. Das zweite Musterpaar gibt eine Invertierung, v.a. der Zeitkoeffizienten, des ersten wieder.

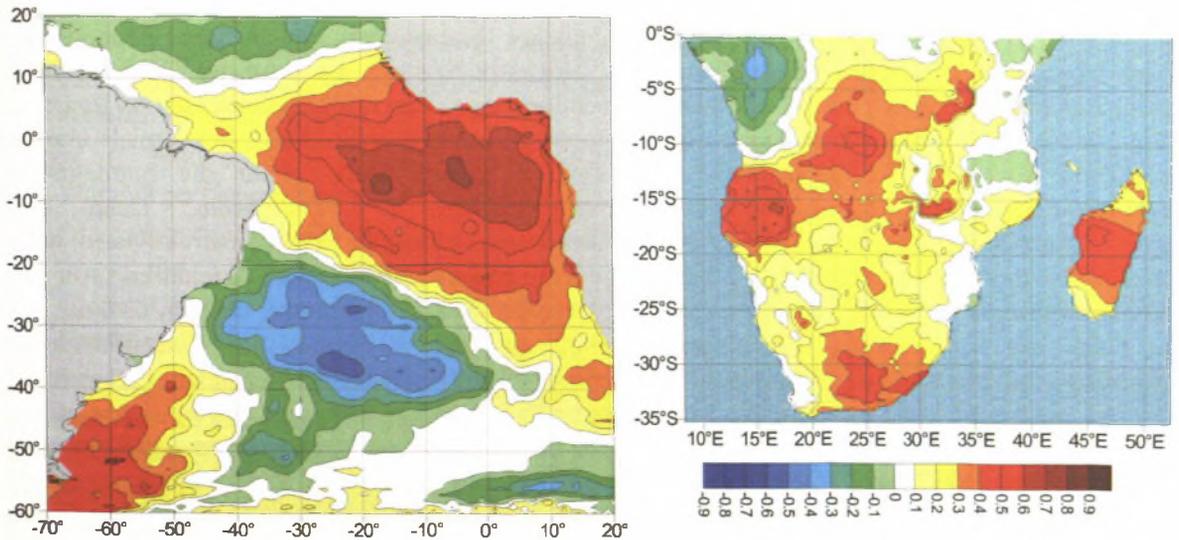


Abb. 3: Drittes gekoppeltes Musterpaar für SSTs im Atlantik (linke Abb.) und Niederschlag (rechte Abb.) für September 1901 bis 2003. Die kanonische Korrelation beträgt 0,50. Die Anteile der erklärten Varianz 14,3% (SST) und 9,2% (Niederschlag).

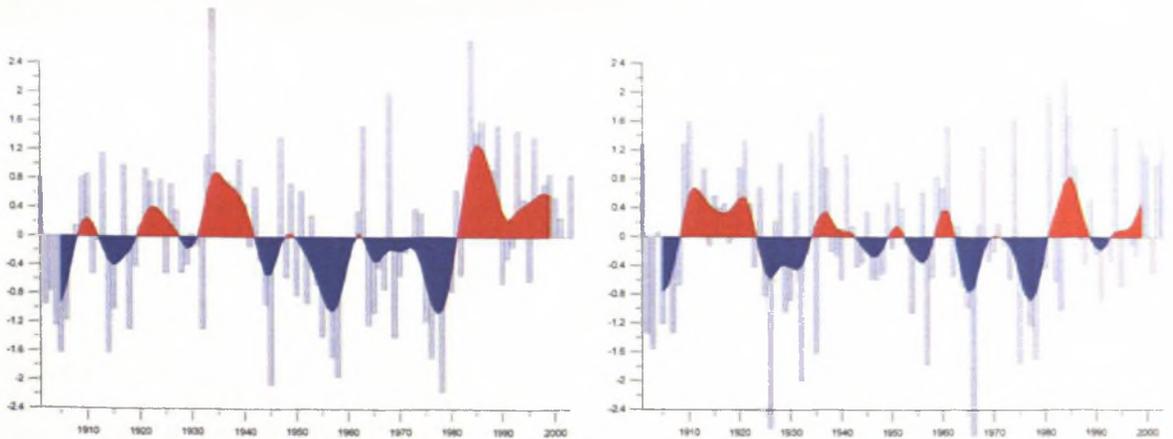


Abb. 4: Zeitkoeffizienten des dritten gekoppelten Musterpaares aus Abbildung 3. Gefilterte Werte (10-jähriger Gauß-Tiefpassfilter) sind blau (negative Werte) bzw. rot (positive Werte) unterlegt.

Solche Kopplungen im Klimasystem lassen sich mit den vorgestellten statistischen Methoden letztlich als Korrelationen beschreiben. Ein physikalisch plausibles Prozessverständnis wird dabei aus Studien der Fachliteratur zugetragen. Allgemeiner können Kopplungen von Systemen bzw. Subsystemen wissenschaftssoziologisch oder wissenschaftstheoretisch thematisieren werden. Die moderne Klimaforschung versteht sich als eine Wissenschaft, welche das Klimasystem verstehen will. Unter diesem Systembegriff werden verschiedene Subsysteme (Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, ...) subsumiert. Damit ist das Forschungsobjekt in der Klimatologie nicht alleine die Atmosphäre sondern diese immer im Zusammenhang mit den weiteren Subsystemen. Daher sind Kopplungen innerhalb des Klimasystems unmittelbarer Gegenstand der Forschung. Zunächst sind Kopplungen in Systemen (ein erkenntnistheoretischer Pessimismus vorausgesetzt) Arrangements von Zuständen durch den Beobachter. Sie sind mithin keine *strukturelle* Kopplungen im Sinne Luhmanns, sie sind im Zusammenhang der vorliegenden Analysen zunächst empirisch „nur“ als Wahrscheinlichkeiten bzw. Korrelationen fassbar. Damit geben sie keinen direkten Aufschluss über Ursache-Wirkungsverhältnisse (dazu: RATHMANN, 2008).

Die Naturwissenschaft als Teil des sozialen Systems konstruiert über Definitionen (beispielsweise von Benguela Niños) zunächst wissenschaftlich relevante Phänomene. Die Gesellschaft wird dabei

allenfalls „irritiert“ (LUHMANN) durch ein mögliches Fischsterben und weitere ökonomische Auswirkungen im Gefolge eines Benguela Niños. Trotzdem lässt sich die Natur der Klimaforschung jedoch nicht komplett von dem sozialen System vereinnahmen. Denn die *Konstruktion* von Benguela Niños stellt eine Repräsentation eines realen Sachverhaltes im Klimasystem dar. Der oftmals implizit geäußerte konstruktivistische Kurzschluss „Natur ist Kultur“ läuft Gefahr die ontologische, erkenntnistheoretische und handlungstheoretische Ebene zu verwechseln. Denn eine menschenunabhängige Wirklichkeit ist geradezu denknotwendig - auch für jeden Konstruktivisten, wenn er nicht den Anspruch erhebt, als Schöpfergott eine creatio ex nihilo zu erschaffen. Auf der erkenntnistheoretischen Ebene hat zwar die „Angst vor der Wahrheit“ (HEGEL, 1988, S. 63), die sich in Folge des kantianischen Erkenntnispessimismus auf jüngere Formen des Konstruktivismus übertragen hat, breiten Niederschlag in der humangeographischen Diskussion gefunden. Jedoch bietet die philosophische Diskussion ein durchaus breiteres Spektrum an Antworten, als die Fokussierung auf soziologisch fundierte Konstruktivismen (vgl. HACKING, 1999). EGNER formuliert – in Anlehnung an LUHMANN - die starke These, es sei „*unbestritten, dass es keinen Beobachtungsstandpunkt außerhalb der Welt gibt*“ (2006, S. 104). Dies mag Konsens in der soziologisch argumentierenden Wissenschaftstheorie sein, aber dies ist zunächst die ontologische Ebene und gemeint scheint aber die epistemologische Aussage, dass es uns (als sterbliche Menschen) nicht möglich ist, diesen „God's eye point of view“ (PUTNAM) einzunehmen. Die fachliche Diskussion hat, insbesondere in der analytischen Philosophie, seit vielen Jahren zu großen Auseinandersetzungen geführt (vgl. Hilary PUTNAM, John SEARLE, Thomas NAGEL), so dass der Wahrheitsanspruch wissenschaftlicher Forschung nicht so rasch beiseite geschoben werden kann. Denn es bleibt (trotzdem) das Ziel der Wissenschaft, die Welt so zu beschreiben und zu erklären, wie sie einem Beobachter außerhalb des sozialen Bezugs- und individuellen Wahrnehmungssystem des Forschers erscheint.

Weitere Punkte gegen allzu konstruktivistische Positionen müssen angeführt werden: Wenn Dinge (wissenschaftliche Untersuchungsobjekte) nur dadurch existieren, dass sie von den Forschern konstruiert wurden (etwa Benguela Niños), macht man sich eine fast solipsistische Position zu Eigen. Es besteht die Gefahr, dass dabei die (empirische) Realität mit der Repräsentation derselben verwechselt wird. Denn selbstverständlich sind statistisch signifikante Kopplungen verschiedener Systeme ein Abbild der Natur, wie es sich unter Berücksichtigung der herangezogenen Methode auf der Basis der vorliegenden Daten ergibt. Das soziale Konstrukt sind die Karten, die Niederschlags-SST-Korrelationen aufzeigen, dies ist nicht die naturwissenschaftliche Realität aber sehr wohl eine Repräsentation derselben. Problematisch ist weiterhin, dass Studien von „Konstruktivisten“ selbst Konstruktionen darstellen; wie können sich diese dann sinnvoll in ein urteilendes Verhältnis zu anderen Konstruktionen setzen? Sind doch die Erkenntnisse konstruktivistischer Ansätze selbst das Resultat sozialer, kultureller, ethnischer, geschlechtlicher Randbedingungen, wie kann dann deren allgemeine Gültigkeit jenseits einer solipsistischen Umgrenzung aufgezeigt werden? „Oder haben empirische Konstruktivisten einen privilegierten Zugang zur Konstruktion wahrer Erkenntnisse?“ (DIEKMANN & PREISENDÖRFER, 2001, S. 54).

Damit soll der Anspruch der Klimaforschung unterstrichen werden, durchaus ein reales Faktum zum Untersuchungsobjekt zu haben und Kopplungen innerhalb des Klimasystems als ontologisch, einer reinen sozialen Konstruktion höherrangig, betrachten zu dürfen ohne in einen unreflektiert-naiven Realismus zurückzufallen.

Literatur

- ALLAN, R.J. & T. ANSELL, 2006, A new globally-complete monthly historical gridded mean sea level pressure data set (HadSLP2): 1850-2004. – J. Climate 19: 2717-2742.
- ARNTZ, W., V.A. GALLARDO, D. GUTIÉRREZ, E. ISLA, L.A. LEVIN, J. MENDO, C. NEIRA, G.T. ROWE, J. TARAZONA & M. WOLFF, 2006, El Niño and similar perturbation effects on the benthos of the Humboldt, California, and Benguela Current upwelling ecosystems. In: Advance in Geosciences 6, S. 243-265.

- BARNETT, T. & R. PREISENDORFER, 1987, Origins and levels of monthly and seasonal forecasts skill for the United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. - *Mon. Weather Rev.*, 115, S. 1825-1850.
- BECK, C. 2000, Zirkulationsdynamische Variabilität im Bereich Nordatlantik-Europa seit 1780. – *Würzburger Geographische Arbeiten* 95, Würzburg, 350S.
- BECK, C. & J. GRIESER,, 2006, Precipitation trends and shifts of rainfall regimes in Africa since 1951. S. 191-194. – In: Lozán, J.L., H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel & C.-D. Schönwiese, Hrsg., 2006, *Global Change: Enough Water for all? - Wissenschaftliche Auswertungen und GEO-Verlag*, Hamburg, 384S.
- BOYER, D., J. COLE & C. BARTHOLOMAE, 2000, Southwestern Africa: Northern Benguela Current Region. - S. 821-840. - In: Sheppard, C., Hrsg., 2000, *Seas at the Millenium: An Environmental Evaluation*. - Vol. I. Pergamon, Amsterdam, 934S.
- COLBERG F., C.J.C. REASON & K. RODGERS, 2004, South Atlantic response to ENSO induced climate variability in an OGCM. - *J. Geophys. Res.* 109, C12015, doi 10.1029/2004JC002301.
- DIEKMANN, A. & P. PREISENDÖRFER, 2001, *Umweltsoziologie*. – Rowohlt, 224 S.
- EGNER, H., 2006, Autopoiesis, Form und Beobachtung – Moderne Systemtheorie und ihr möglicher Beitrag für eine Integration von Human- und Physiogeographie. – *Mitteilungen der Österreichischen Geogr. Gesellschaft* 148: 92-108.
- FLORENCHIE, P., J.R.E. LUTJEHARMS, C.J.C. REASON; S. MASSON & M. ROUAULT, 2003, The source of Benguela Niños in the South Atlantic Ocean. – *Geophys. Res. Lett.* 30 doi: 10.1029/2003GL017172.
- FLORENCHIE, P., REASON, C.J.C., LUTJEHARMS, J.R.E., ROUAULT, M., ROY, C. & MASSON, S., 2004, Evolution of interannual warm and cold events in the southeast Atlantic Ocean. – *J. Climate* 17: 2318-2333.
- GAMMELSRØD, T., C.H. BARTHOLOMAE, D.C. BOYER, V.L.L. FILIPE & M.J. O'TOOLE, 1998, Intrusion of warm surface layers along the Angolan-Namibian coast in February-March 1995: The 1995 Benguela Niño. - *S. Afr. Mar.Sci* 19.
- HACKING, I., 1999, Was heißt "soziale Konstruktion"? Zur Konjunktur einer Kampfvokabel in den Wissenschaften. – Fischer, Frankfurt/Main, 208S.
- HAGEN, E., J.J. AGENBAG & R. FEISTEL, 2005, The winter St. Helena climate index and extreme Benguela upwelling. - *J. of Marine Science* 57: 219-230.
- HEGEL, G.W.F., 1988, *Phänomenologie des Geistes*. – Meiner, Hamburg, 631S.
- HIRST, A.C. & S. HASTENRATH, 1983, Atmosphere-Ocean Mechanisms of Climate Anomalies in the Angola-Tropical Atlantic Sector. – *J. Phys. Oceanogr.* 13: 1146-1157.
- HUANG, B. & Z.-Z. HU, 2007, Cloud-SST feedback in southeastern tropical Atlantic anomalous events. - *JGR* 112, C03015, doi:10.1029/2006JC003626.
- HULME, M., 1992, Rainfall changes in Africa: 1931-1960 to 1961-1990. - *Int. J. Climatol.* 12: 685-699.
- JACOBET, J., 1993, Regionale Unterschiede im atmosphärischen Zirkulationsgeschehen bei globalen Klimaveränderungen. - *Die Erde* 124: 63-77.
- MESTAS-NUÑEZ, A.M., 2000, Orthogonality Properties of Rotated Empirical Modes. - *Int. Journal Climatol.* 20: 1509-1516.
- NEW, M.G., M. HULME & P.D. JONES, 1999, Representing twentieth-century space-time climate variability. I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. - *J. Climate* 12: 829-856.
- NEW, M.G., M. HULME & P.D. JONES, 2000, Representing twentieth-century space-time climate variability. II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. - *J. Climate* 13: 2217-2238.

- NICHOLLS, N., 1987, The use of canonical correlation to study teleconnections. - *Mon. Wea. Rev.* 115: 393-399.
- ÖSTERLE, H., F.-W. GERSTENGARBE & P.C. WERNER, 2003, Homogenisierung und Aktualisierung des Klimadatensatzes der Climate Research Unit der Universität of East Anglia, Norwich.- *Terra Nostra* 2003/6: 326-329.
- RATHMANN, J., 2008, Kausalität in der Systemtheorie: ein Problemaufriss. S. 55-71. – In: Egner, H., B. Ratter & R. Dikau, Hrsg., *Umwelt als System – System als Umwelt? Systemtheorien auf dem Prüfstand*, Oekom Verlag.
- RATHMANN, J., 2009, Klima- und Zirkulationsvariabilität im südhemisphärischen Afrika seit Beginn des 20. Jahrhunderts. – *Geographica Augustana* (im Druck).
- RATHMANN, J. & J. JACOBET, 2003, Klima- und Zirkulationsveränderungen im südlichen Afrika in den letzten 100 Jahren. - *Zbl. Geol. Paläont. Teil I, Heft 1/2*: 53-67.
- RATHMANN, J. & J. JACOBET, 2009, Solar signals in southern hemisphere African climate since 1901. – *Advanced Science Letters* 2: 1-9.
- RAYNER, N.A.; PARKER, D. E.; HORTON, E. B.; FOLLAND, C. K.; ALEXANDER, L. V.; ROWELL, D. P.; E.C. KENT & A. KAPLAN, 2003, Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. - *JGR* 108, No. D14 ,4407 10.1029/2002JD002670, 2003.
- REASON, C.J.C., W. LANDMAN & W. TENNANT, 2006a, Seasonal to Decadal Prediction of Southern African Climate and its links with variability of the Atlantic Ocean. – *BAMS*: 941-955.
- REASON, C.J.C., P. FLORENCIE, M. ROUAULT & J. VEITCH, 2006b, Influences of Large Scale Climate Modes and Agulhas System Variability on the BCLME Region. S. 225-241. – In: SHANNON, V., G. Hempel, P. Malanotte-Rizzoli, C. Moloney & J. Woods, Eds., 2006, *Large Marine Ecosystems* 14, Elsevier.
- ROUAULT, M., P. FLORENCHIE, N. FAUCHEREAU & C.J.C. REASON, 2003, South East tropical Atlantic warm events and southern African rainfall. - *GRL* 30, No. 5, 8009, doi: 10.1029/2002GL014840, 2003.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 2000, *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. - 3. Aufl. Borntraeger, Berlin, 298S.
- SCHOTT, G., 1931, Der Peru-Strom und seine nördlichen Nachbargebiete in normaler und anormaler Ausbildung - *Annalen der Hydrographie u. Maritimen Meteorologie* 59: 161-169, 200-213, 240-252.
- SHANNON, L.V., A.J. BOYD, G.B. BRUNDRIT & J. TAUNTON-CLARK, 1986, On the existence of an El Nino-type phenomenon in the Benguela system. – *J. of Marine Research* 44: 495-520.
- SHANNON, L.V. & G. NELSON (1996): The Benguela: Large Scale Features and Processes and System Variability. S. 163-210. - In: Wefer, G., W.H. Berger, G. Siedler & D.J. Webb, Eds., 1996, *The South Atlantic: Present and Past Circulation*. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. 644S.
- SHILLINGTON, F.A., C.J.C. REASON, C.M. DUNCOMBE RAE, P. FLORENCIE & P. PENVEN, 2006, Large Scale Physical Variability of the Benguela Current Large Marine Ecosystem (BCLME). S. 47-68. – In: Shannon, V., G. Hempel, P. Malanotte-Rizzoli, C. Moloney & J. Woods, Eds., 2006, *Large Marine Ecosystems* 14, Elsevier.
- SMAYDA, T. J., 2000, Ecological features of harmful algal blooms in coastal upwelling ecosystems. - *S. Afr. J. Mar. Sci.*, 22: 219-253.
- VON STORCH, H. & F.W. ZWIERS, 1999, *Statistical Analysis in Climate Research*. - Cambridge University Press, Cambridge, 484S.
- WASHINGTON, R. & M. TODD, 1999, Tropical-Temperate links in Southern African and southwest Indian Ocean Satellite-Derived daily rainfall. - *Int. J. Climatology* 19, S. 1601-1616.