

Klima- und Zirkulationsveränderungen im südlichen Afrika in den letzten 100 Jahren

Joachim Rathmann und Jucundus Jacobeit, Würzburg

Abstract: This paper presents first results of a study, analysing the spatial patterns of climate variability and long-term changes in southern Africa. Trend analyses confirm the well known warming with strongest temperature increase in the central interior of southern Africa. Precipitation, however, does not show any significant trend pattern. The major modes of sea-surface temperature (SST), sea-level pressure, temperature and precipitation variability have been derived by principal component analyses (PCA). The resulting time coefficients from the PCAs have further been analysed by canonical correlation analysis in order to investigate the influence of the SSTs on the climate of southern Africa. Special emphasis is put on discussions of recent climate change in terms of external forcing factors, in particular of changing solar activity.

Zusammenfassung: Es werden erste Resultate einer Studie vorgestellt, die die räumliche Struktur der Klimavariabilität und langzeitliche Klimaänderungen im südlichen Afrika untersucht. Trendanalysen bestätigen die bekannte Temperaturzunahme mit einer maximalen Erwärmung im zentralen südlichen Afrika. Der Niederschlag zeigt dagegen keine statistisch signifikanten Trendmuster. Die wichtigsten Variabilitätsmodi von Meeresoberflächentemperatur, Bodenluftdruck, Temperatur und Niederschlag wurden durch Hauptkomponentenanalysen bestimmt. Mit den daraus resultierenden Zeitkoeffizienten wurden kanonische Korrelationsanalysen gerechnet, um den über die atmosphärische Zirkulation hergestellten Einfluss der Meeresoberflächentemperaturen auf das Klima im südlichen Afrika zu bestimmen. Abschließend werden externe Einflüsse auf jüngste Klimaänderungen diskutiert, insbesondere aufgrund veränderter solarer Aktivität.

1. Einführung

Über die Klimaentwicklung im südlichen Afrika während der letzten Jahrhunderte ist, verglichen mit den historischen Kenntnissen für Europa, recht wenig bekannt. Selbst seit Mitte des 17. Jahrhunderts, als die Europäer sich dauerhaft dort niederließen, ist die Dokumentation über das klimatische Geschehen äußerst lückenhaft. Die ersten kontinuierlich betriebenen Wetterstationen wurden erst in den

frühen 1840er Jahren eingerichtet, fast ausschließlich im Gebiet der heutigen Republik Südafrika. Erst Anfang des 20. Jahrhunderts gab es eine nennenswerte Anzahl an Stationen im zentralen und nördlichen Südafrika. Kontinuierliche und verlässliche Klimaaufzeichnungen im tropischen Zentralafrika begannen noch erheblich später (LINDESAY 1998).

Insgesamt liegen originale Klimadaten meist nur äußerst lücken- und fehlerhaft vor. Daher werden in zahlreichen Arbeiten ergänzend auch Proxydaten und geschichtliche Quellen zur Rekonstruktion des Klimas herangezogen. Will man das analytische Instrumentarium, das uns für rezente Datensätze zur Verfügung steht, für die Untersuchung längerfristiger Klimaveränderungen einsetzen, ist man auf relativ kurze Zeiträume angewiesen, die mit analysierten metrischen Datensätzen abgedeckt werden können. Für das südliche Afrika umfasst dies meist nur 100–130 Jahre.

Die vorliegende Studie konzentriert sich auf das letzte Jahrhundert mit der Intention, auf der Basis analysierter Beobachtungsdaten mittels bi- und multivariater statistischer Methoden Klima- und Zirkulationsveränderungen im südafrikanischen Raum aufzuzeigen. Nach einer kurzen Beschreibung der verwendeten Datensätze werden methodische Aspekte und Ergebnisbeispiele von Trendanalysen bezüglich Temperatur und Niederschlag vorgestellt. Es folgen methodische Grundlagen und erste Resultate zirkulationsdynamischer Analysen. Anschließend werden externe Einflüsse auf das Klima im südlichen Afrika thematisiert und insbesondere mit Blick auf die Solaraktivität quantitativ analysiert.

2. Datengrundlage

Für Niederschlag und Temperatur konnten die Gitterboxdaten der Climatic Research Unit (University of East Anglia, Norwich) herangezogen werden. Sie liegen global in einer räumlichen Auflösung von $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ vor und decken die Landflächen der Erde mit Ausnahme der Antarktis für den Zeitraum 1901–1998 ab. Damit stehen für den afrikanischen Raum südlich des Äquators 3530 Gitterfelder zur Verfügung.

Die Rekonstruktion des Datensatzes erfolgte auf der Basis von Stationsmessdaten. Fehlende Werte wurden mittels der Anomalien signifikant korrelierter Nachbarstationen bezüglich eines gut dokumentierten Referenzzeitraumes abgeschätzt. Die vervollständigten Stationswerte lassen sich nach dem thin-plate splines Verfahren anschließend zu Gitterfeldern interpolieren (NEW et al. 2000). Dieser Datensatz zeichnet sich durch optimierte interne Konsistenz aus und ist in seiner räumlichen und zeitlichen Auflösung einzigartig. Trotzdem ist er nicht gänzlich frei von Sprüngen, die schwerlich rein klimatologisch erklärt werden können.

Zirkulationsanalysen basieren auf den Gitterfeldern des Global Mean Sea Level Pressure (GMSLP2.1f) Datensatzes. Dieser wurde vom U.K. Met. Office in Zusammenarbeit mit dem CSIRO (Australien) und der NIWA (Neuseeland) entwickelt und liegt global in einer $5^\circ \times 5^\circ$ Auflösung für 1871 bis 1994 vor. Die

Zuverlässigkeit der Daten nimmt hier allerdings in den hohen südlichen Breiten deutlich ab (BASNETT & PARKER 1997).

Zur Analyse der Meeresoberflächentemperatur (Sea Surface Temperature = SST) werden die Global Sea-Ice Sea Surface Temperature (GISST2.3b) Daten des U.K. Met. Office in einer $1^\circ \times 1^\circ$ Auflösung für 1871 bis 1998 herangezogen, zusätzlich die von A. KAPLAN zusammengestellten SST Anomalien in einer räumlichen Auflösung von $5^\circ \times 5^\circ$ für 1856–1991.

3. Trendanalysen

Die Analyse klimatischer Trends beginnt mit der Definition eines adäquaten Zeitraumes, für den sinnvoll von "Trends" gesprochen werden kann. Ein sehr kurzer Zeitraum gibt eher zufällige Fluktuationen von Witterung und Klima wider, ein sehr langer Zeitraum hingegen setzt sich oft aus auf- und absteigenden Phasen im Verlauf des betrachteten Klimaelementes zusammen. Statistische Überlegungen aus gleitenden Trendanalysen zeigen, dass sinnvolle Untersuchungsintervalle für den Niederschlag oberhalb von etwa 30 Jahren, für die Temperatur auch schon von etwa 20 Jahren liegen (RAPP 1997, SCHÖNWIESE 2002). Im Folgenden werden 30-jährige Intervalle als zeitliche Untergrenzen angesehen.

Die lineare Einfachregression ist unter den verschiedenen Möglichkeiten, den Trend einer Zeitreihe zu bestimmen, die am häufigsten verwendete Methode (SCHÖNWIESE 2002). Dabei wird der Trend aus der Differenz der Ordinatenwerte am End- und Anfangspunkt linearer Regressionsgeraden ermittelt. Derartige Regressionen wurden zunächst an jedem einzelnen der 3530 südafrikanischen Gitterfelder berechnet. Aus diesen separaten Trends lassen sich schließlich kontinuierliche Trendkarten interpolieren.

Die hohe räumliche Variabilität des Niederschlages und seine Abhängigkeit von der Orographie machen es erforderlich, einen relativen Trend, d.h. die prozentuale Abweichung vom Mittelwert anzugeben, ansonsten werden Trends mit absoluten Werten dargestellt.

Um die Signifikanz der berechneten Trends zu überprüfen, wird das Trend-Rauschverhältnis (T/R) ermittelt. Dabei dient die Standardabweichung der Daten als Maß für das sog. Hintergrundrauschen. Liegt das T/R-Verhältnis betragsmäßig über 1, übersteigt der errechnete Trend das mittlere Niveau der "quasi -natürlichen Variabilität", allerdings liegt (bei annähernd normalverteilten Daten) die Sicherheitswahrscheinlichkeit lediglich bei etwa 68 % (JACOBET 2000). Verlässlichere 95 % werden erst mit einem T/R-Verhältnis von 1,96 erreicht.

3.1 Die Trendstruktur der Temperatur

Die globale Temperaturzunahme seit Ende des 19. Jahrhunderts schlägt sich auch im südlichen Afrika nieder. Die regionale Verteilung der Temperaturtrends (Abb. 1) weist über weite Räume auf eine markante Erwärmung hin, die sich über alle

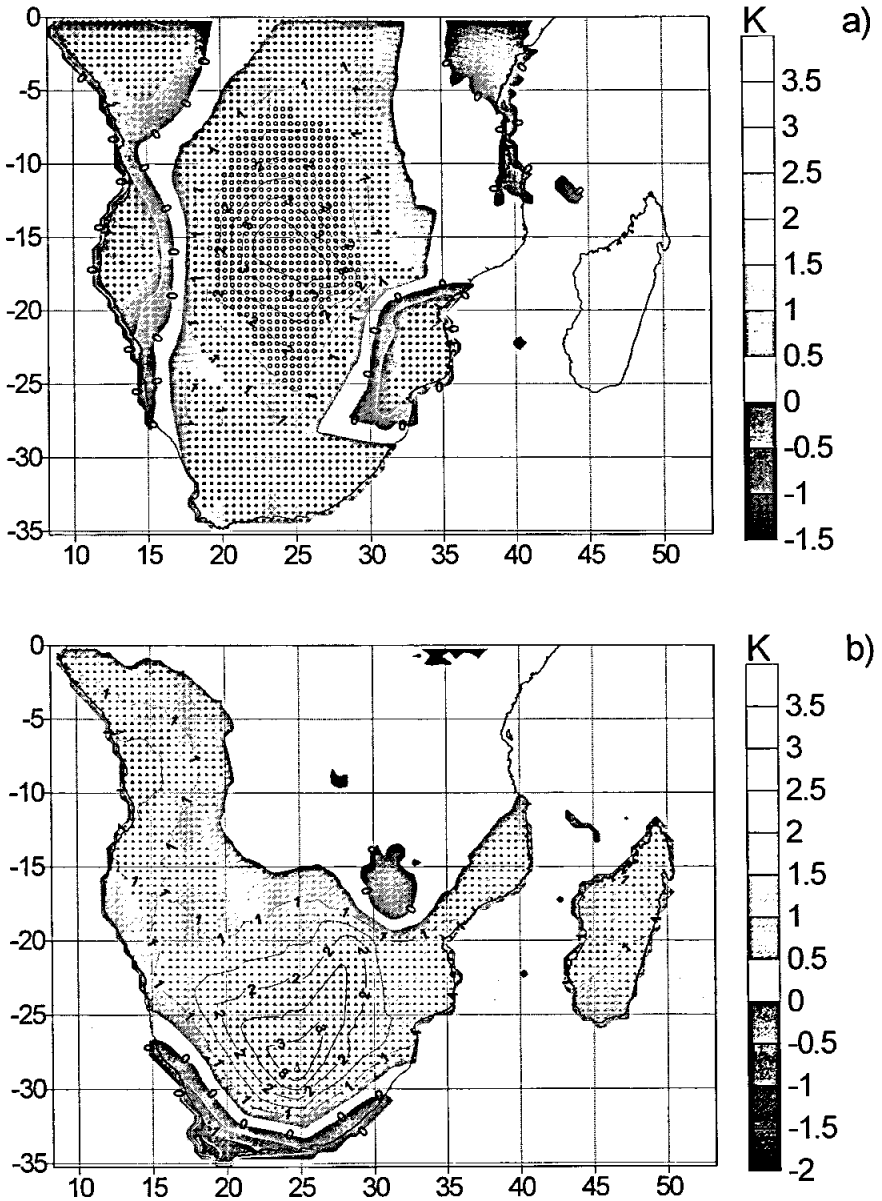


Abb. 1. Lineare Trends der Temperatur im südlichen Afrika für den Monat März für die Intervalle 1901–1930 (a) und 1901–1998 (b). Gitterboxen, bei denen der Trend die Standardabweichung übersteigt, sind durch Punkte markiert, bei 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit sind die Kreise vergrößert.

Fig 1. Linear trends of march temperature in southern Africa for the period 1901–1930 (a) and 1901–1998 (b). Grid boxes, with trends exceeding the standard deviations, respectively, are marked by dots, enlarged circles indicate the 95% significance level.

Monate und fast alle Zeitintervalle hinweg hervorhebt. Die stärkste Temperaturzunahme erfolgte in den 1910er bis 1930er Jahren und ab den 1970er Jahren.

Der Trend übersteigt in großen Teilen des Untersuchungsgebietes das "natürliche Rauschen" und ist insbesondere im zentralen Botswana statistisch signifikant. Die auch aus anderen Arbeiten bekannte Temperaturzunahme (HOUGHTON 2001, HULME et al. 2001, GIORGI 2002) erreicht im zentralen südlichen Afrika maximale Werte mit über 2 K pro Jahrhundert.

Auffällig ist ein Temperaturrückgang in der Kapregion, der sich auch bei HULME et al. (2001), nicht jedoch bei HOUGHTON (2001) und SCHÖNWIESE (2002) findet. Vergleiche mit Stationsdaten von Kapstadt aus dem GHCN-Datensatz zeigen eine hohe Verlässlichkeit der Gitternetzdaten in diesem Raum, allerdings sind in beiden Datensätzen auffällige Inhomogenitäten Ende der 1940er Jahre erkennbar (vgl. Abb. 2). Dies lässt vermuten, dass die regionale Temperaturabnahme eher auf Datenprobleme, als auf einen natürlichen Trend zurückzuführen ist.

Ein problematischer Gesichtspunkt bei der Interpretation der Temperaturtrends ist der mögliche Effekt zunehmender Urbanisierung. Unterliegen Messstationen dem Einfluss zunehmender städtischer Überwärmung, kann der klimatische Erwärmungstrend überschätzt werden. Global ist dieser Einfluss sehr gering (HOUGHTON 2001), für Südafrika wird er allerdings auf bis zur Hälfte der gemessenen Temperaturzunahme veranschlagt (HUGHES & BALLING 1996). Auf der Basis der CRU Gitternetzdaten lässt sich dieser Einfluss jedoch nicht abschätzen (NEW et al. 2000), dies soll daher in einem späteren Vergleich mit Stationsdaten erfolgen.

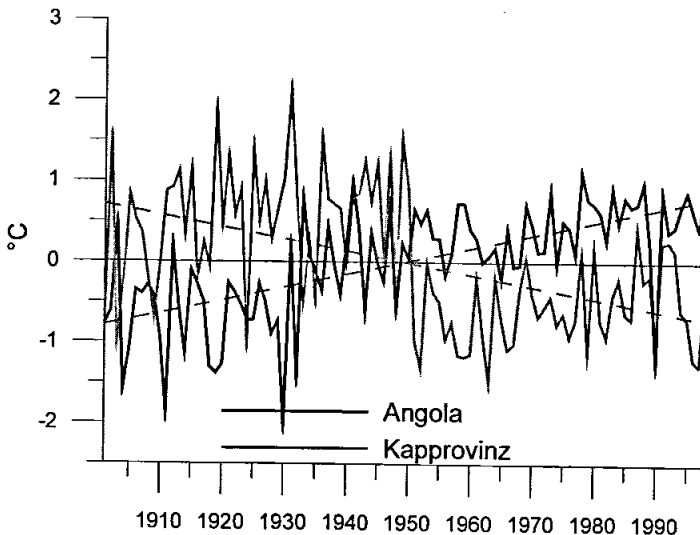


Abb. 2. Temperaturverlauf 1901–1998 im Monat März für Gebietsmittel der Regionen "Angola" und "Kapprovinz" mit entsprechenden Regressionsgeraden.

Fig. 2. Temperature variations 1901–1998 during March for areal means of the regions "Angola" and "Cape province" with corresponding regression lines.

3.2 Die Trendstruktur des Niederschlages

Aufgrund der hohen Bedeutung des Niederschlages für die Kulturen in den Trockengebieten des südlichen Afrikas besteht traditionell ein großes Interesse an Untersuchungen zu Niederschlagsveränderungen. Der Niederschlag ist räumlich und zeitlich wesentlich variabler als die Lufttemperatur und zeigt daher bei weitem nicht so ausgeprägte Trends. Globale Analysen indizieren eine Niederschlagszunahme für weite Teile Botswanas, Sambias und Angolas, dagegen einen Rückgang für das südliche Südafrika und Mosambik (HOUGHTON 2001, GIORGI 2002). Der Rückgang in Südafrika wurde bereits von TYSON et al. (1975) aufgezeigt und auf das Auftreten unterschiedlich langer Niederschlagszyklen zurückgeführt.

Die vorliegenden Ergebnisse für die Jahresmittelwerte (Abb. 3) belegen, dass die berechneten Trends statistisch kaum signifikant sind. Einzelmonatliche Analysen zeigen eine noch größere Variabilität mit noch geringeren Anteilen an signifikanten Trends. Selbst ein T/R-Verhältnis von 1 wird nur im Bereich des westlichen Tansanias und Angolas überschritten. Hier ist für den Gesamtzeitraum eine Niederschlagszunahme zu verzeichnen. Ansonsten dominiert bei den Jahresmittelwerten großräumig ein leichter Negativtrend. Nur im Zeitraum 1969–1998 übersteigt der Niederschlagstrend die Standardabweichung großräumig. Deutlich zeigt sich ein Rückgang für weite Teile des Untersuchungsraumes, während Niederschlagszunahmen in Ostafrika und ganz im Südwesten erkennbar sind.

Zunehmende Temperaturen (s.o.) bei gleich bleibenden oder abnehmenden Niederschlägen bewirken einen verstärkten Stress auf die Vegetation. Darauf deutet die markante Ausdehnung der Wüstenklimate "BW" (nach der Köppen'schen Klassifikation) insbesondere im südlichen Afrika in den letzten vier Dekaden hin (FRAEDRICH et al. 2001). Änderungen in der Erdoberflächenbedeckung wirken ihrerseits auf das Klima zurück. Die Ausdehnung der BW Klimate könnte daher als Ergebnis einer Rückkopplung von Vegetation und Klima angesehen werden.

4. Zirkulationsveränderungen

Ein in der Klimaforschung weit verbreitetes und bewährtes Verfahren, eine große Datenmenge auf eine kleine Anzahl an Faktoren zu verdichten, die einen Großteil der Originalvarianz repräsentieren, ist die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis = PCA). Bei zirkulationsdynamischen Studien sind v.a. zwei grundlegende Analysemodi zu unterscheiden:

Im t-Modus gehen von der Untersuchungsgröße (z.B. Luftdruck) die Zeiteinheiten (z.B. Monate) als Variablen in die Analyse ein, die Raumeinheiten (z.B. Gitterpunkte) bilden die Ereignisfälle. Die resultierenden Hauptkomponentenwerte können als räumliche Zirkulationsmuster angesprochen werden, deren zeitlicher Verlauf durch die Hauptkomponentenladungen wiedergegeben wird.

Analysen mit den verfügbaren Luftdruckdaten deuten auf eine Intensivierung der subtropischen Antizyklonen, insbesondere derjenigen im Südindik, im

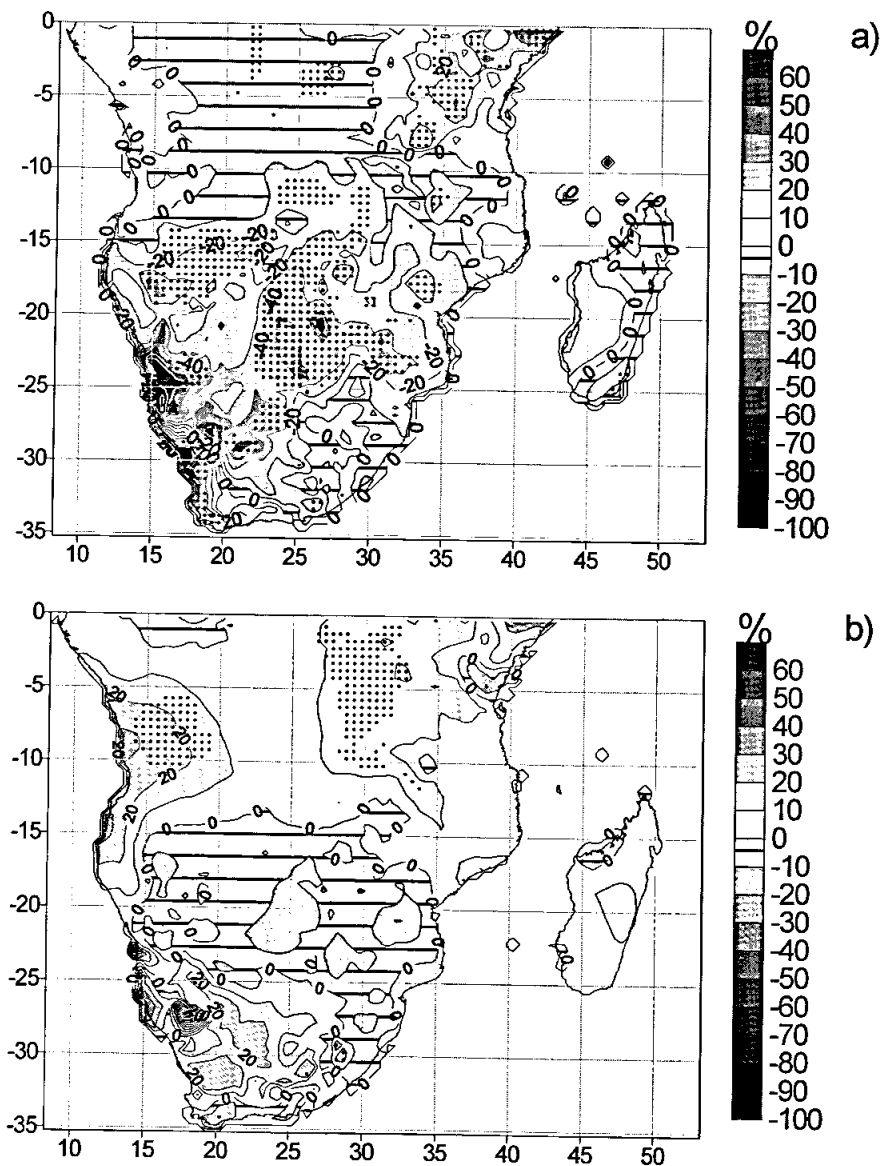
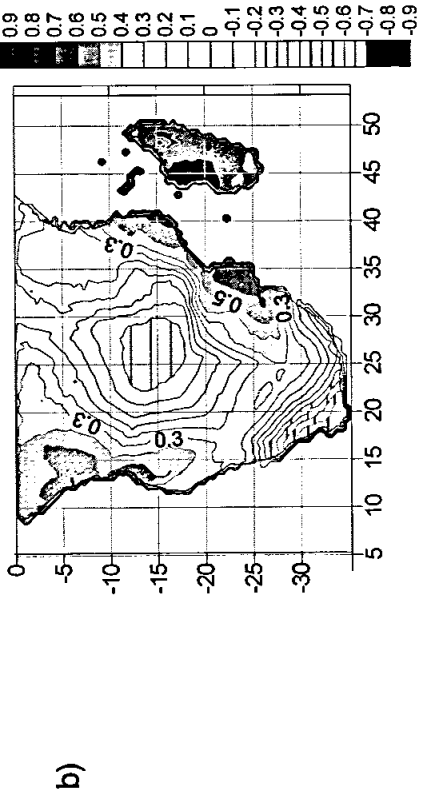
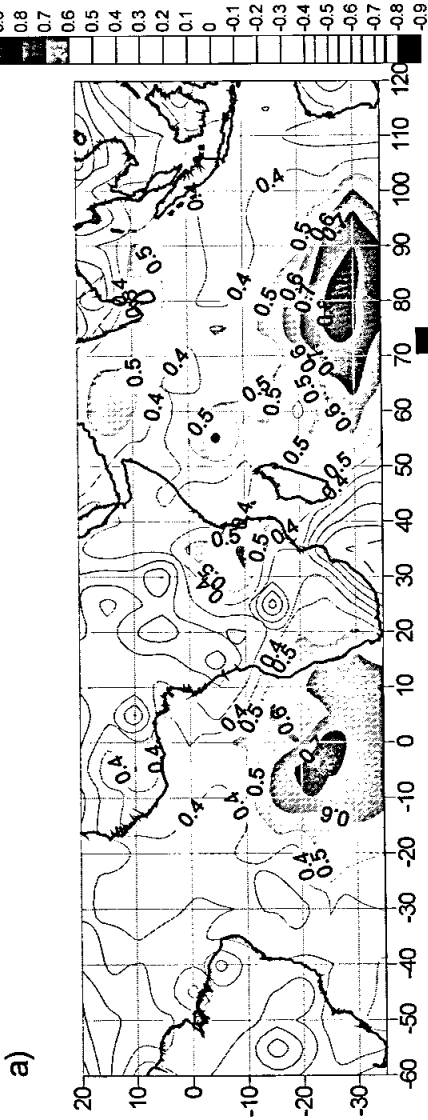


Abb. 3. Relative lineare Trends des Jahresniederschlages im südlichen Afrika (Abweichung in Prozent vom Mittelwert) für die Intervalle 1969–1998 (a) und 1901–1998 (b). Gitterboxen, bei denen der Trend die Standardabweichung übersteigt, sind durch Punkte markiert, bei 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit sind die Kreise vergrößert.

Fig 3. Relative linear trends of annual precipitation in southern Africa (deviation in % from the mean) for the intervalls 1969–1998 (a) and 1901–1998 (b). Grid boxes, with trends exceeding the standard deviations, respectively, are marked by dots, enlarged circles indicate the 95% significance level.



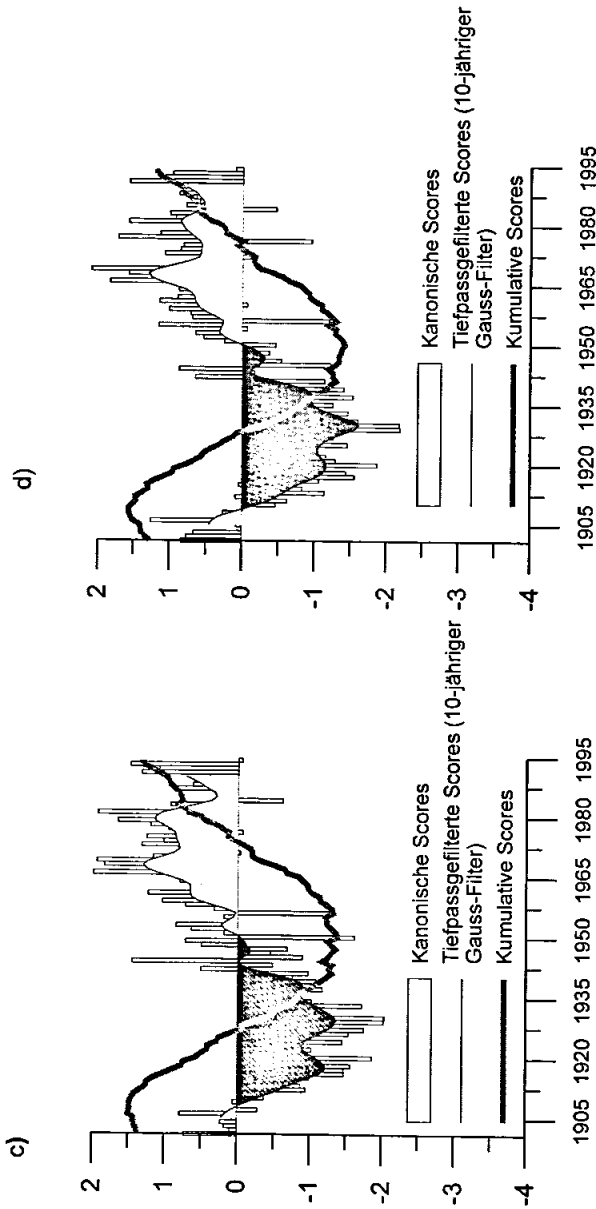


Abb. 4. Erstes kanonisches Variablenpaar der Analyse monatlicher Bodenluftdruck- (a) und Temperaturfelder (b) für Januar 1901–1994. Die Varianzklärungsanteile liegen bei 6,3 % bzw. 8,2 %, der kanonische Korrelationskoeffizient bei 0,86. Die zeitliche Entwicklung (kanonische Scores) geht aus Teil c (Bodenluftdruckmuster) und Teil d (Temperaturmuster) hervor.

Fig. 4. First pair of canonical patterns for gridded SLP (a) and temperature data (b) for January 1901–1994. The explained variances are 6,3 % and 8,2 %, respectively. The canonical correlation coefficient is 0,86. Time Series (canonical scores) are shown in sections c (for the SLP pattern) and d (for the temperature pattern).

Zeitraum 1871–1994 hin (vgl. ALLAN et al. 1995). Dies wird durch Trendanalysen gestützt, die für diesen Zeitraum eine Zunahme des Luftdrucks im südlichen Atlantik und südlichen Indischen Ozean anzeigen.

Bei s-modalen PCAs gehen von der Untersuchungsgröße die Raumeinheiten als Variablen in die Analyse ein, die Zeiteinheiten als Fälle. Damit lässt sich eine Regionalisierung des betrachteten Parameters durchführen. Die resultierenden räumlichen Muster (Ladungen) können als "Variationszentren" angesprochen werden, deren zeitlicher Verlauf in den Hauptkomponentenwerten wiedergegeben wird. In der vorliegenden Studie wurden zunächst sämtliche zur Verfügung stehenden Klimatelemente mit Hilfe s-modaler PCAs regionalisiert. Die Zeitkoeffizienten dieser Variationszentren dienen als Grundlage zu weiterführenden kanonischen Korrelationsanalysen. Diese bestimmen die multivariaten Zusammenhänge zwischen zwei Variablengruppen. Dabei werden mehrere kanonische Variablenpaare bestimmt, die, vergleichbar den Ergebnissen einer PCA, wieder räumliche Muster und dazugehörige Zeitkoeffizienten liefern. Diese Methode ist insbesondere gut geeignet, um Zusammenhänge der atmosphärischen Zirkulation mit der Temperatur und dem Niederschlag oder den SSTs in räumlicher und zeitlicher Ausprägung herauszuarbeiten.

Der Einfluss der SSTs auf den südafrikanischen Niederschlag ist inzwischen durch umfangreiche Literatur belegt (z.B. Mason 1995, Landmann & MASON 1999, REASON & MULENGA 1999, NICHOLSON 2001, SCHINKE & JACOBET 2002). Daher soll hier eine Kopplung der atmosphärischen Zirkulation mit der Lufttemperatur am Beispiel des Monats Januar illustriert werden (Abb. 4).

Regionen mit positiven Korrelationskoeffizienten im Luftdruckmuster sind hinsichtlich ihrer Variabilität positiv gekoppelt mit Regionen im Temperaturmuster, die ebenfalls positive Korrelationskoeffizienten aufweisen. Unterschiedliche Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten zwischen zwei Regionen deuten auf ein entgegengesetztes Variationsverhalten der beiden Klimatelemente hin. Eine positive Abweichung des Luftdrucks geht dann mit einer negativen Abweichung der Temperatur einher und umgekehrt (Negativkopplung).

Die Resultate dieser Analyse zeigen eine starke Positivkopplung des Maskarenenhochs mit der Temperatur im südöstlichen Teil des Untersuchungsraumes. Im zentralen südlichen Afrika ist eine Negativkopplung ausgebildet. Eine weitere Positivkopplung besteht zwischen der Hochdruckzelle im südlichen Atlantik und weiten Bereichen des nördlichen Namibias und Angolas.

Die Zeitkoeffizienten (kanonische Scores) dieses Musterpaares zeigen eine ausgeprägte Dominanz positiver Werte seit Mitte des 20. Jahrhunderts, während in der ersten Hälfte ausschließlich negative Werte auftreten. Der Verlauf der Zeitreihen impliziert zunächst eine ansteigende Bedeutung des hier dargelegten Musterpaares. Dies kann durch einen synchronen Anstieg von Temperatur und Luftdruck in den Gebieten mit hohen Korrelationskoeffizienten erklärt werden. Die Positivkopplungen der Temperatur liegen in den Gebieten maximaler Temperaturzunahme im 20. Jahrhundert, diejenigen des Luftdrucks v.a. in den südozeanischen Hochdruckgebieten, deren Intensitätszunahme bereits durch PCAs herausgestellt werden konnte.

Hier wird der Zusammenhang eines hohen (niedrigen) subtropischen Luftdruckes mit hohen (niedrigen) Lufttemperaturen in den küstennahen Regionen des Atlantiks und des Indischen Ozeans, einschließlich Madagaskar, verdeutlicht. Die Kapprovinz und das zentrale südliche Afrika zeigen bei der Temperatur eine inverse Kopplung mit dem Luftdruck der ozeanischen Antizyklen.

5. Externe Einflüsse

Kennzeichnend für externe Einflüsse auf das Klimasystem ist das Faktum, dass jene nicht in Wechselwirkung mit diesem stehen. Die wichtigsten Beispiele sind Sonnenaktivität, Vulkanismus und Änderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre durch den Menschen. Im folgenden soll exemplarisch auf den Einfluss der Sonne eingegangen werden.

Solaraktivität

Die solar-klimatischen Zusammenhänge sind Bestandteil jahrzehntelanger Diskussionen, ohne dass eine abschließende Bewertung absehbar ist (SCHÖNWIESE et al. 1992, HOYT & SCHATTEN 1997, RIND 2002).

Auf Zeitskalen von Jahrmillionen, Jahrtausenden und Jahrhunderten sind Einflüsse der Sonne bekannt und plausibel zu illustrieren. Beispielsweise gab es in der sog. "Kleinen Eiszeit" kalte Intervalle, für die sich eine reduzierte Aktivität der Sonne rekonstruieren lässt. Die variable Sonnenaktivität schlägt sich klimarelevant in Änderungen der Solarkonstante nieder (heutiges Mittel bei etwa 1368 W/m^2), näherungsweise indiziert in der Sonnenfleckenrelativzahl. In den vergangenen 100 Jahren beträgt die Schwankungsamplitude der Solarkonstante allerdings nur etwa 0,15 %. Der strahlungsbedingte Einfluss auf die Troposphäre ist damit äußerst gering (HOYT & SCHATTEN 1997).

Zur Quantifizierung des solaren Einflusses auf das Klima stehen verschiedene Parameter zur Diskussion: neben Solarkonstante und Sonnenfleckenrelativzahl auch der Sonnendurchmesser, die Sonnenfleckenzykluslänge sowie gravitationsbedingte Sonnenvariationen (SCHÖNWIESE et al. 1992). Bisher ist allerdings weiter unklar, welches der Parameter ist, der eine physikalische Kausalität mit dem Erdklima am besten begründen kann. Dabei besteht unter den angeführten Parametern eine hohe Korrelation zwischen der mit einem 11-jährigen Tiefpassfilter geglätteten Sonnenfleckenrelativzahl und der Solarkonstante.

In diesem Beitrag wird als Maß für die Solarstrahlung die von LEAN et al. (1998) rekonstruierte Solarkonstante verwendet. Erste Korrelationen mit dem Niederschlag im südlichen Afrika zeigen keine signifikanten Zusammenhänge. Bei der Betrachtung der SSTs wurden maximale Korrelationskoeffizienten in den hohen südlichen Breiten berechnet. Dort ist allerdings die Datenlage am wenigsten verlässlich, so dass sich diese Ergebnisse kaum inhaltlich auswerten lassen. Daher

soll im Folgenden beispielhaft die Kopplung mit der Lufttemperatur dargelegt werden (Abb. 5). Die Korrelationskoeffizienten sind dabei in denjenigen Regionen (Botswana und Angola) am höchsten, die in den vergangenen 100 Jahren die höchste Temperaturzunahme zu verzeichnen haben (vgl. Abb. 1). Daraus kann auf einen möglichen Einfluss veränderter Solaraktivität auf die Lufttemperatur geschlossen werden, eine physikalische Kausalkette lässt sich damit jedoch nicht begründen.

Vulkanismus

Neben der solaren Aktivität muss auch der Vulkanismus als eine mögliche Einflussgröße bei der Betrachtung von Klimaänderungen berücksichtigt werden. Klimatisch wirksam sind v.a. plinianische Eruptionen andesitischer Vulkane, die die Stratosphäre erreichen und dort eine Temperaturzunahme bewirken, während die Troposphäre sich abkühlt.

Die vulkanischen Aerosole können mehrere Monate bis Jahre in der Stratosphäre verweilen. Klimatisch besonders wichtig sind darüber hinaus die aus Schwefelgasen über Gas-Partikel-Konversion gebildeten Sulfataerosole. Um den Einfluss von Vulkanausbrüchen auf das Klima zu quantifizieren wurden verschiedene Indizes entwickelt. Der älteste und früher gebräuchlichste ist der Dust Veil Index von LAMB, heute stützen sich zahlreiche Arbeiten etwa auf den Volcanic Explosivity Index nach SIMKIN oder den Ice Core Volcanic Index (ROBOCK & FREE 1995).

Insgesamt sind einzelne Vulkanausbrüche aber nur 2–3 Jahre klimatisch wirksam. Von Bedeutung sind daher kumulative Effekte über mehrere Jahre oder Jahrzehnte hinweg. Umgekehrt kann die Abwesenheit von stark explosivem Vulkanismus wie in den 1920er bis 1940er Jahren eine Wärmephase begünstigen.

Regionale Spezifikationen für das südliche Afrika sind Bestandteil kommender Untersuchungsphasen.

6. Fazit und Ausblick

Aus den bisherigen Ergebnissen wird die starke interannuelle und dekadische Variabilität des Niederschlages im südlichen Afrika deutlich. Ein klarer Trend lässt sich dabei nicht erkennen. Dagegen manifestiert sich eine markante Temperaturzunahme in den letzten Dekaden. Die vielfältigen Ursachen dafür liegen zum einen in internen Umstellungen der atmosphärischen Zirkulation, insbesondere im Zusammenhang mit ansteigenden Meeresoberflächentemperaturen. Daneben sind verschiedene externe Einflüsse, insbesondere die veränderliche Solaraktivität und anthropogene Einflussnahmen (Treibhausgasemissionen) zu berücksichtigen.

Insgesamt ist bei allen Analysen und Ergebnissen die einschränkende Aussagekraft in einer problematischen Datenlage begründet. Daher sollen weitere Untersuchungen mit ergänzenden Datensätzen sowie mit zusätzlichen statistischen

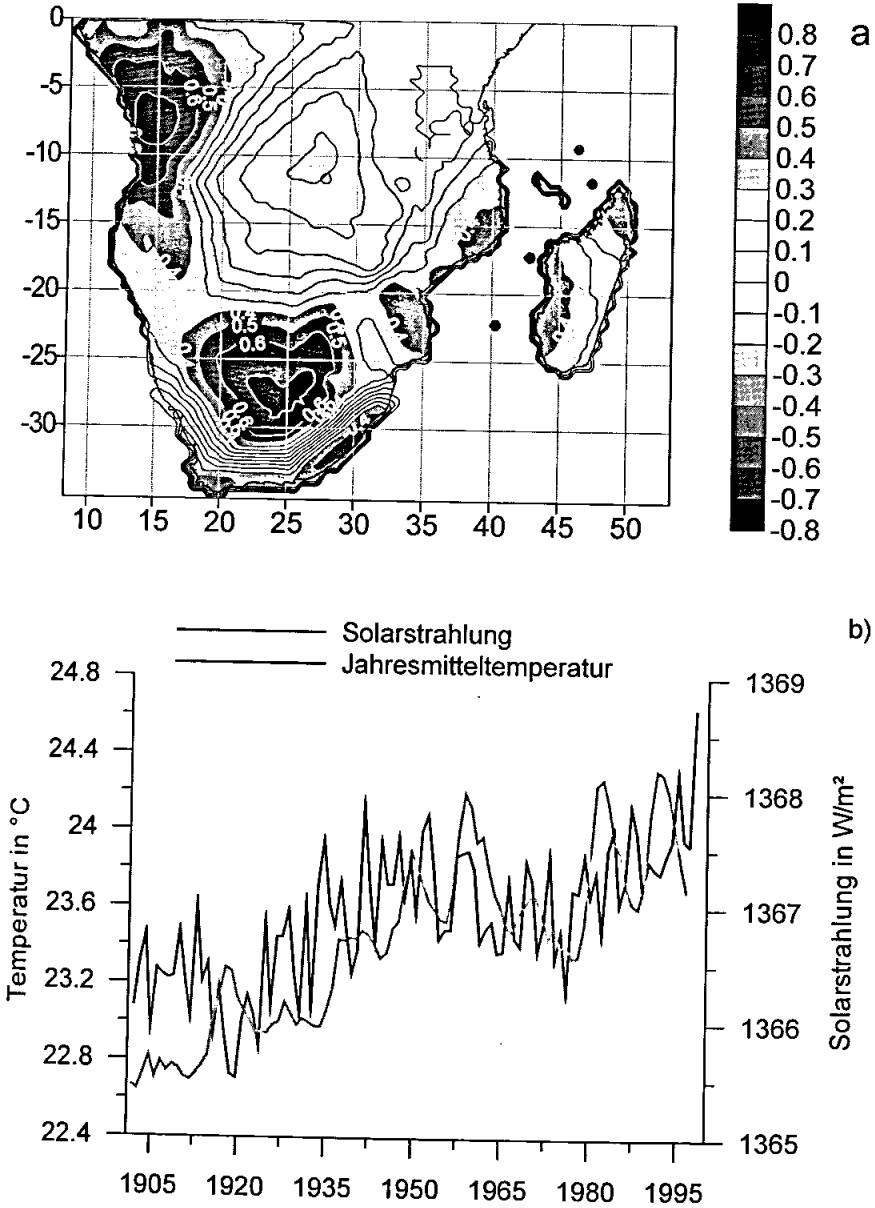


Abb. 5. Korrelationen der Solarstrahlung mit der Lufttemperatur im südlichen Afrika (a); Zeitreihe der Jahresmitteltemperatur für die Region "Angola" und der Solarstrahlung (b).
 Fig. 5. Correlations of solar radiation and air temperature in southern Africa (a); time series of annual mean temperature for the region "Angola" and of the solar radiation (b).

Methoden (Singular Value Decomposition, multiple Regressionen), durchgeführt werden. Insbesondere erweiterte Zeitreihenanalysen mit Wavelets zielen auf eine vertiefte Untersuchung der Beziehungen externer Einflussfaktoren (unter Einschluss vulkanischer Signale) zur längerfristigen Klimavariabilität im südlichen Afrika.

Danksagung: Die vorliegende Studie ist Teil eines Projekts im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs "Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung in Afrika" der Fakultät für Geowissenschaften an der Universität Würzburg.

Literatur

- ALLAN, R.J., LINDESAY, J.A. & REASON, C.J.C. (1995): Multidecadal Variability in the Climate System over the Indian Ocean Region during the Austral Summer. – *J. of Climate* **8**: 1853–1873; Boston.
- BASNETT, T.A. & PARKER, D.E. (1997): Development of the Global Mean Sea Level Pressure Data Set GMSLP2.1. – Climate Research Technical Note 79. Hadley Centre, Met. Office; Bracknell.
- FRAEDRICH, K., GERSTENGARBE, F.-W. & WERNER, P.C. (2001): Climate Shifts during the last century. – *Climatic Change* **50**: 405–417; Dordrecht.
- GIORGI, F. (2002): Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: observations. – *Climate Dynamics* **18**: 675–691; Berlin.
- HOUGHTON, J.T. (eds.) (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. – 881 S., Cambridge University Press, New York.
- HOYT, D.V. & SCHATTEN, K.H. (1997): *The Role of the Sun in Climate Change*. – 279 S., Oxford University Press, New York, Oxford.
- HUGHES, W.S. & BALLING, Jr., R.C. (1996): Urban influences on South African temperature trends. – *Int. J. Climatol.* **16**: 935–940; Chichester.
- HULME, M., DOHERTY, R., NGARA, T., NEW, M. & LISTER, D. (2001): African climate change: 1900–2100. – *Climate Res.* **17**: 145–168; Oldendorf/Luhe.
- JACOBET, J. (2000): Rezente Klimaentwicklung im Mittelmeerraum. – *PGM* **144**: 22–33; Gotha.
- LANDMAN, W.A. & MASON, S.J. (1999): Change in the association between Indian Ocean Sea-Surface Temperatures and summer rainfall over South Africa and Namibia. – *Int. J. Climatol.* **19**: 1477–1492; Chichester.
- LEAN, J., BEER, J. & BRADLEY, R. (1998): *Reconstructed Solar Irradiance Data*. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 1998-028. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- LINDESAY, J. (1998): Past climates of Southern Africa. S. 161–206 – In: HOBBS, J.E., LINDESAY, J.A. & BRIDGMAN, H.A. (1998): *Climates of the Southern Continents. Present, Past and Future*. – 297 S., John Wiley & Sons, Chichester, New York.
- MASON, S.J. (1995): Sea-surface temperature – South African rainfall associations, 1910–1989. – *Int. J. Climatol.* **15**: 119–135; Chichester.
- NEW, M., HULME, M. & JONES, P. (2000): Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–1998 monthly grids of terrestrial surface climate. – *J. of Climate* **13**: 2217–2238; Boston.
- NICHOLSON, S.E. (2001): Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. – *Climate Res.* **17**: 123–144, Oldendorf/Luhe.

- RAPP, J. (1997): Regionale und jahreszeitliche Trendanalyse des Niederschlages und der Lufttemperatur in Deutschland. – PGM **141**: 99–107; Gotha.
- REASON, C.J.C. & MULENGA, H. (1999): Relationship between the south African rainfall and SST anomalies in the southwest Indian Ocean. – Int. J. Climatol. **19**: 1651–1673; Chichester.
- RIND, D. (2002): The Sun's Role in Climate Variations. – Science **296**: 673–677; Washington.
- ROBOCK, A. & FREE, M.P. (1995): Ice cores as an index of global volcanism from 1850 to the present. – J. of Geophys. Res. **100**: 11549–11567; Washington.
- SCHINKE, H. & JACOBET, J. (2002): Large-scale Atmospheric Circulation Patterns Linked to Anomalies of Namibian Summer Rainfall. – PGM **146**: 28–33; Gotha.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2002): Beobachtete Klimatrends im Industriezeitalter. Ein Überblick global/Europa/Deutschland. – Berichte d. Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main. Nr. 106. 93 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D., ULRICH, R. & BECK, F. (1992): Solare Einflüsse auf die Temperaturvariationen der Erde in den letzten Jahrhunderten. – Berichte d. Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main. Nr. 92. 215 S.
- TYSON, P.D., DYER, T.G.J. & MAMETSE, M.N. (1975): Secular changes in South African rainfall: 1880 to 1972. – Quart. J. R. Met. Soc. **101**: 817–833, London.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Geogr. Joachim Rathmann, Geographisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg.

Prof. Dr. Jucundus Jacobet, Geographisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg.