

- BENEVENT, E.: Reculées du Jura Central. La vallée de la Seille (étude morphologique). *Rev. Geogr. Alpine* 20/2, 1932, 267–306.
- BENOIT, E.: Essais sur les anciens glaciers du Jura. *Actes Soc. Helv. Sc. Nat.* 38e sess., 1853, 231–247.
- BIROT, P.: Le relief calcaire. Paris, 1966 (CDN).
- BREMER, H.: Intramontane Ebenen, Prozesse der Flächenbildung. *Z. Geomorph. NF, Suppl. Bd. 23*, 1975, 26–48.
- CHABOT, G.: Les Plateaux du Jura Central. Etude morphologique. *Publ. Fac. Lettres Univ. Strasbourg* 41, 1927, 350 S.
- CHAUVE, P.: Jura. *Guides Géol. Régionaux*, Paris (Masson), 1975, 216 S.
- CHAUVE, P. & PERIAUX, J.: Le Jura. In: *Debelmas: Géologie de la France*, Paris Bd. 2, 1971, 443–461.
- DEBELMAS, J.: *Géologie de la France*, vol. II. Paris (doin), 1974, 544 S.
- DELEBECQUE, A.: Sur les terrains glaciaires des feuilles de Besançon, Pontarlier et Lons-le-Saunier. *Bull. Serv. Cart. Géol. France* 19/122, 1909, 72–77.
- DERRUAU, M.: *Prévis de Géomorphologie*. Paris (Masson), 1965, 4. Aufl.
- FENELON, P.: Phénomènes karstiques. *Mém. et Doc. du C.N.R.S.*, vol. 4, 1967, 391 S.
- FOURNET, J.: Note sur les effondrements de divers terrains. *Mém. de l'Acad. Imp. des Sc., Belles-Lettres et Arts de Lyon* 2, 1852, 175–204.
- FOURNIER, E.: *Les Gouffres*. Besançon, 1923.
- FRACHON, J.-C.: Etude géomorphologique des reculées du Jura Lédonien. In: *Elements de la Géographie Comtoise, Cahiers de Géographie de Besançon*, no. 24, 1975, 77–115.
- GARDET, G.: Glaciaire et fluvioglaciaire des environs de Chausseuans près Poligny (Jura). *C.R. Somm. des Séances de la Soc. Géol. de France*, 1940, 62–64.
- GIRARDOT, ABB.: Note sur les glaciers du Jura Lédonien. *Mém. de la Soc. d'Emul. du Jura*, 1902, 387–388.
- GUILLAUME, A.: Relations et évolution morphotectonique des plateaux centraux et de la haute chaîne du Jura. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.* 4/2, 1962, 103–114.
- LAUBSCHER, H. P.: Ein kinematisches Modell der Jurafaltung. *Ecl. Geol. Helv.* 58, 1965, 231–318.
- LEBEAU, R.: Le Vignoble du Jura et le problème des reculées. *Les Etudes Rhodaniennes* 22, 1947, 83–98.
- LIENHARDT, G.: Géologie du bassin houiller Stéphanien du Jura et de ses morts-terrains. *Mém. Bur. Rech. Géol. Min.*, no. 9, 1962, 447 S.
- MARTONNE, E DE: *Traité de géographie physique* (3. vol.). Paris, 1948 (COLIN), 8. Aufl.
- NUSSBAUM, F. & GYGAX, F.: Zur Ausdehnung des risseiszeitlichen Rhône-gletschers im französischen Jura. *Ecl. Geol. Helv.* 28, 1935, 659–665.
- PASQUIER, L. du: Sur les limites de l'ancien glacier du Rhône le long du Jura. *Bull. Soc. Sc. Natur. Neuchâtel*, Bd. 20, 1892.
- PIROUTET, M.: Les différentes phases glaciaires dans le Jura salinois. *Bull. Soc. Géol. France*, 4e sess., 25/1–2, 1925, 49–58.
- TRICART, J.: Quelques aspects particuliers des glaciations quaternaires du Jura. *Rev. Géogr. de l'Est*, 5/4, 1965, 499–527.
- VENETZ, J.: Sur le glacier du Rhône et les anciens glaciers jurassiens. *Actes Soc. Helv. Sc. Nat.*, 28e sess., 1843, 78.
- VEZIAN, A.: Les anciens glaciers du Jura. *Ann. Club alpin français* 3, 1876, 487–509.

Geologische Karten

- Carte Géologique au 1:50 000, XXXII –26 (Lons-le-Saunier),
 XXXIII–24 (Quingey),
 XXXIII–25 (Salins-les-Bains),
 XXXIII–26 (Champagnole).

SOLARE AKTIVITÄTSSCHWANKUNGEN UND NIEDERSCHLAGSFLUKTUATIONEN IN WESTAFRIKA

Mit 10 Abbildungen

DIETER KLAUS*

Summary: Fluctuations of solar activity and fluctuations of precipitation in western Africa.

The annual totals of precipitation recorded at West African observation stations during the period 1921–73 were allied with the phases of maximal and minimal solar activity. The phase of minimal numbers of sunspots present macro-regionally significant deviations of the precipitation totals from the long-term mean.

Negative deviations of precipitation in the Senegalese-Mauritanien coastal zone, together with positive deviations of annual precipitation totals from the long-term mean,

can be meaningfully established two years before the occurrence of the sunspot minimum. Two years after a sunspot maximum there are considerable precipitation deficits almost everywhere in the West African region.

The homogeneous time series of the annual precipitation totals of 18 West African stations were subjected to variance spectrum analysis. The spatial ordering of variance shares, as explained over an eleven and twenty-two year period, shows that the time series of the West African precipitation totals are by no means uniformly determined by this periodicity. On the contrary, areas can be defined in which the single or, as the case may be, the double sunspot cycle is indentifiable as being highly significant in the precipitation fluctuations.

The annual movements of the ITC are theoretically noted down by means of their spatial precipitation distributions,

*) Der Deutschen Forschungsgemeinschaft möchte ich für die finanzielle Unterstützung dieser Untersuchung herzlich danken.

and investigated in respect of their periodicity. In the west of West Africa a 13 year period clearly emerges. A 24 and 30 year period can be established on the basis of the discharge data for the Senegal and Niger rivers, which is also repeated in the frequency of occurrence of the mixed and meridional forms of circulation over Europe.

Die zeitlichen Seespiegelschwankungen des Viktoriasees folgten im ersten Drittel dieses Jahrhunderts recht genau den solaren Aktivitätsschwankungen. Im zweiten Drittel dieses Jahrhunderts brach die enge Beziehung zwischen diesen beiden Parametern unerwartet ab. Ähnliches konnte für viele andere Klimaparameter, deren Abhängigkeit von den solaren Aktivitätsschwankungen als statistisch gesichert galt, weltweit beobachtet werden.

Die Nichtstationarität dieser solar-terrestrischen Beziehungen führte dazu, daß die Euphorie, mit der von klimatologischer Seite die enge Beziehung zwischen den Sonnenfleckenzahlen und einigen Klimaparametern zunächst zu Prognoseregeln benutzt wurde, weitgehender Skepsis wich. Nur noch sehr vereinzelt wurde in der Mitte dieses Jahrhunderts großräumig nach möglichen solar-troposphärischen Zusammenhängen gesucht. Seit Beginn der sechziger Jahre ist die Erforschung der solar-terrestrischen Beziehungen auch im klimatologischen Bereich durch neue Erkenntnisse, die vorwiegend von geophysikalischer Seite veröffentlicht wurden, erneut in Angriff genommen worden. Die Zahl der Arbeiten, die solar-klimatische Abhängigkeitsverhältnisse zum Gegenstand haben, ist besonders in den letzten Jahren sprunghaft angestiegen. Vorwiegend von russischer Seite liegen viele Arbeiten vor, die Zusammenhänge zwischen den solaren Aktivitätsschwankungen und dem irdischen Wetter unbestreitbar nachweisen (vgl. DZERDZEYEVSKIY, 1974 und dort zitierte Literatur).

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, auf der Basis geographischer Verteilungsmuster des Niederschlags über Westafrika in Abhängigkeit zu den solaren Aktivitätsschwankungen Licht in die raum-zeitliche Dynamik der Niederschlagsgenese im Ablauf der Phasen des einfachen und doppelten Sonnenfleckenzyklus zu bringen.

Niederschlagsverteilung im Ablauf des einfachen Sonnenfleckenzyklus

Die vieljährigen monatlichen Niederschlagswerte für 327 Stationen Westafrikas wurden freundlicherweise teils von der ASECNA (Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar) in Dakar, teils von der ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et technique outre-mer) in Paris zur Verfügung gestellt. Eine Sichtung und Überarbeitung des Materials zeigte, daß die Zeitreihen der Monatsdaten für 78 Stationen im Zeitraum 1921–1973 homogenisiert werden konnten. Diese Zeitreihen liegen der weiteren Analyse zugrunde.

Zunächst wurde überprüft, ob spezielle räumliche Anordnungen der jährlichen Niederschlagssummen beim Auftreten maximaler bzw. minimaler Sonnenfleckenzahlen zu beobachten sind. Dazu wurden die Jahressummen des Niederschlags für jede der 78 Stationen Westafrikas für alle dreijährigen Intervalle um die Fleckenmaxima und -minima addiert und gemittelt. Im wesentlichen fallen in den Zeitraum von 1921 bis 1973 fünf 11-jährige Sonnenfleckenzyklen. In Abbildung 1 und 2 sind für die dreijährigen Perioden um die Fleckenextrema die mittleren Niederschlagssummen in Prozent der langjährigen Mittelwerte angeführt. Es wird deutlich, daß im Mittel aller berücksichtigten Sonnenfleckenzyklen im Zonalstreifen 12–17° N durchgängig Niederschlagsüberschüsse in Höhe von 5–10% des langjährigen Mittels auftreten. Die in Abhängigkeit zu den Sonnenflecken gebildeten Niederschlagsmittelwerte wurden mit Hilfe eines t-Tests auf die Signifikanz ihrer Abweichungen vom langjährigen Mittel untersucht. Dazu wurde das BMD Standardprogramm 13 D (t-Test-Programm) benutzt. Die nicht dargestellte räumliche Anordnung der t-Statistik zeigt, daß eine Abweichung der auf die Sonnenfleckenvariationen bezogenen Niederschlagssummen vom langjährigen Mittel dann mit ca. 5%iger Irrtumswahrscheinlichkeit vorliegt, wenn die in Abbildung 1 und 2 dargestellten Prozentwerte 95 bzw. 105% unter- bzw. überschreiten.

Im Falle minimaler Sonnenfleckenzahlen heben sich einige Gebiete überdurchschnittlich hoher Niederschlagssummen im Bereich des 15. Breitenkreises signifikant heraus. Bei den maximalen Sonnenfleckenzahlen lassen sich nur punktuelle negative signifikante Abweichungen vom langjährigen Mittel erkennen. Eine Ausnahme bildet hier die nördliche atlantische Westküste Afrikas und die östlich anschließenden Räume. Hier treten zum Teil mit 0,1%iger Irrtumswahrscheinlichkeit im Gefolge von maximalen Sonnenfleckenzahlen hohe positive Niederschlagsanomalien im Mittel auf.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß im Gefolge minimaler Sonnenfleckenzahlen weite Areale signifikanter Abweichungen der jährlichen Niederschlagshöhen gegenüber dem langjährigen Mittel nachweisbar sind. Im Falle maximaler Sonnenfleckenzahlen treten jedoch Niederschlagsdefizite nur isoliert auf, Niederschlagsüberschüsse kennzeichnen allerdings den nördlichen Senegal und den Süden Mauretaniens.

Die Arbeiten von LIPOVKA (1970) haben gezeigt, daß zunehmende Sonnenfleckenzahlen auf der Südhemisphäre mit verstärkter Meridionalzirkulation, abnehmende hingegen mit verstärkter Zonalzirkulation verbunden sind. Eine Häufigkeitszunahme meridionaler Zirkulationsstrukturen ist in den hohen Breiten der Südhemisphäre mit einer Temperaturzunahme, verstärkte Zonalzirkulation mit einer Temperaturabnahme verbunden. DORITZE (1976) stellt Beziehungen zwischen der Stärke der St. Helena-Antizyklone und

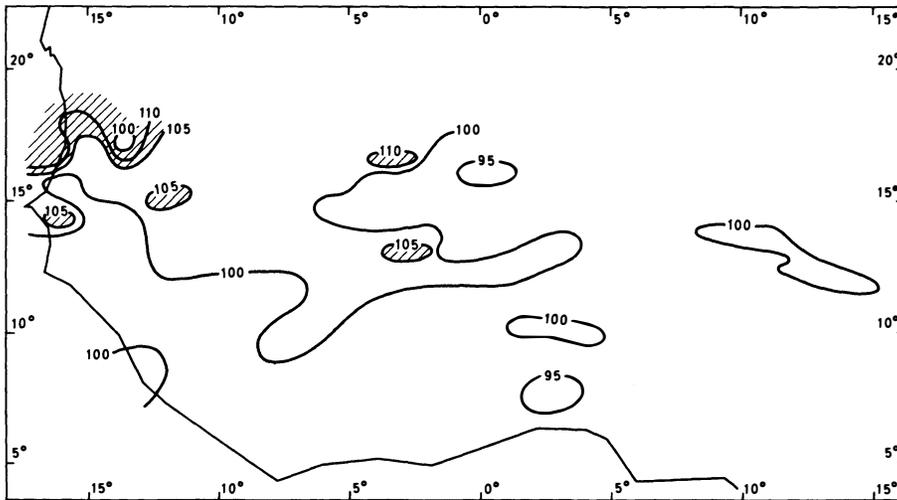


Abb. 1: Mittlere Höhe der jährlichen Niederschläge beim Auftreten der Sonnenfleckenmaxima im Zeitraum 1921–1973, ausgedrückt in Prozent der mittleren jährlichen Niederschlagssumme des Beobachtungsintervalles

Mean total of annual precipitation during the occurrence of sunspot maxima over the period 1921–73, expressed as a percentage of the mean annual precipitation total of the observation interval

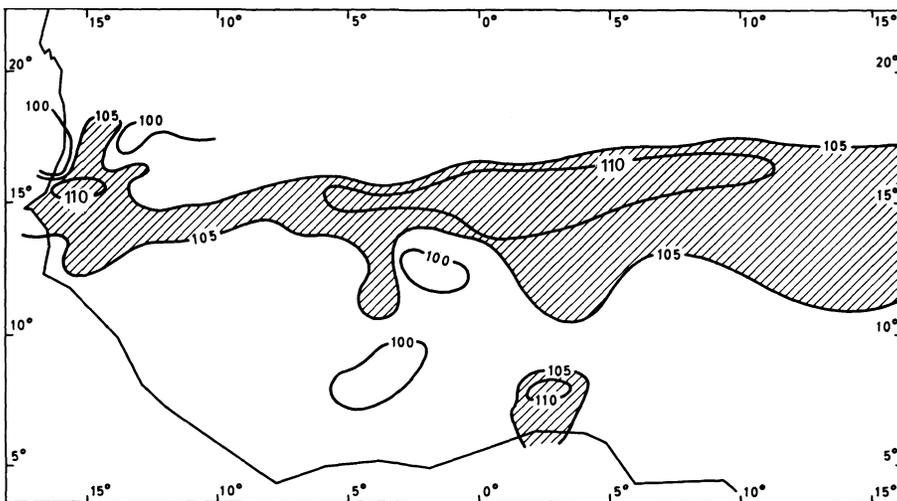


Abb. 2: Mittlere Höhe der jährlichen Niederschläge beim Auftreten der Sonnenfleckenminima im Zeitraum 1921–1973, ausgedrückt in Prozent der mittleren jährlichen Niederschlagssumme des Beobachtungsintervalles

Mean amount of annual precipitation at the occurrence of sunspot minima over the period 1921–73, expressed as a percentage of the mean annual precipitation total of the observation interval

den Temperaturen hoher südlicher Breiten her. Danach ist die St. Helena-Antizyklone bei negativen Temperaturenanomalien in den polaren Breiten der Südhemisphäre kräftig ausgebildet, im Falle positiver Temperaturenanomalien in diesen Breiten hingegen schwach.

MALEY (1973) interpretiert die Lage der ITC als Balancezone zwischen den Luftströmen der nord- und südhemisphärischen subtropischen Antizyklonen (St. Helena- und Azoren- bzw. Lybien-Antizyklone). Eine

positive Luftdruckanomalie in der St. Helena-Antizyklone ohne nordhemisphärische Entsprechung führt zu einer nordwärtigen Abdrängung der ITC gegenüber ihrer mittleren Lage, eine negative Luftdruckanomalie bewirkt im Gegensatz dazu eine äquatorwärtige Verlagerung der ITC (innertropische Konvergenzzone).

Die positiven signifikanten mittleren Niederschlagsanomalien im Bereich des 15. nördlichen Breitenkreises (Abb. 2) beim Auftreten minimaler Sonnenflecken-

zahlen könnten diesen Ergebnissen entsprechend auf folgende Mechanismen zurückgeführt werden: Abnehmende Sonnenfleckenzahlen bedingen statistisch gesehen eine Zunahme zonaler Zirkulationsstrukturen in den hohen Breiten der Südhemisphäre. Diese implizieren eine Verstärkung des meridionalen Temperaturgradienten bei gleichzeitiger Verstärkung des Luftdruckes im Bereich der St. Helena-Antizyklone. Diese positive Druckanomalie in der südhemisphärischen subtropischen Antizyklone führt verstärkt südhemisphärische Luftmassen auf die Nordhalbkugel. Eine Verstärkung des Südwestmonsuns ist ebenso die Folge wie eine Nordverlagerung der ITC. Die niederschlagsgenetisch wirksame Zone vorherrschender Luftmassenkonzentration verstärkt sich und verlagert sich polwärts gegenüber der langjährigen mittleren Position dieser Konfluenzzone. Die in Abb. 2 gezeigten positiven Niederschlagsanomalien könnten die Folge sein.

Die in Verbindung mit den Sonnenfleckenmaxima auftretenden positiven Niederschlagsanomalien im Bereich der nördlichen afrikanischen Westküste können durch nordhemisphärische Beeinflussung der Zirkulationsstrukturen in diesem Raum erklärt werden. Bekanntlich treten im Gefolge verstärkter solarer Aktivität bevorzugt meridionale Zirkulationsstrukturen im atlantisch-europäischen Sektor auf (SCHUURMANS, 1969). Diese sind durch eine Verstärkung des 200-mb-Höhentrog westlich der afrikanischen Westküste ausgezeichnet. Eine Intensivierung tropischer Störungen durch überlagernde hochtroposphärische Tröge ist wiederholt belegt (RIEHL, 1954; KLAUS, 1976) und würde die Niederschlagszunahme im Norden des Senegals und im südlichen Mauretanien erklären.

BAUR (1964) glaubt an Hand langjähriger Beobachtungsreihen des Smithsonian Instituts nachweisen zu können, daß die sogenannte Solarkonstante Schwankungen von ca. 0,5% im Ablauf eines Sonnenfleckenzyklus unterliegt. Im Intervall 3–4/10 des ansteigenden und zwischen 2–6/10 der absteigenden Aktivitätsphase kommt es zu maximalen Werten der Solarkonstanten, ein scharfer Minimalwert der Solarkonstanten tritt ca. 1 Jahr vor dem Fleckenminimum auf.

Diesen Phasen maximaler bzw. minimaler Werte der sogenannten Solarkonstanten wurden gleichermaßen die jährlichen Niederschlagssummen Westafrikas zeitlich zugeordnet, in Bezug zum langjährigen Mittel gesetzt und auf ihre signifikante Abweichung von diesem überprüft.

Abb. 3 zeigt das Raummuster der jährlichen Niederschlagssummen für den Fall minimaler Werte der Solarkonstanten im Intervall 1–2 Jahre vor dem Fleckenminimum. Hochsignifikante negative Niederschlagsanomalien kennzeichnen die atlantische Westküste, positive Anomalien hingegen den Bereich um den 15. nördlichen Breitenkreis östlich von 5° W.

In Abb. 4 sind die mittleren prozentualen Abweichungen der jährlichen Niederschlagssummen für das Zeitintervall 1–2 Jahre nach dem Fleckenmaximum vom langjährigen Mittel dargestellt. Nach BAUR sind in diesem Zeitintervall maximale Werte der Solarkonstanten anzunehmen. Durchgehend treten im gesamten westafrikanischen Raum Niederschlagsdefizite in diesem Zeitintervall hervor, die gemäß dem t-Test großräumig signifikant verschieden vom langjährigen Mittel sind. Eine klimatologische Interpretation dieses interessanten Phänomens kann nicht gegeben wer-

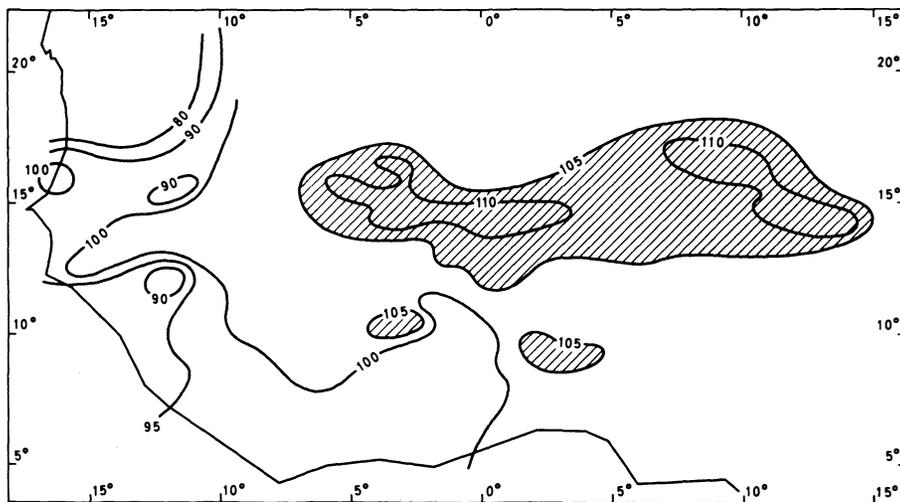


Abb. 3: Mittlere Höhe der jährlichen Niederschläge für den Fall minimaler Werte der sogenannten Solarkonstanten (BAUR, 1964) im Intervall 1–2 Jahre vor den Fleckenminima des Zeitraumes 1921–1973, ausgedrückt in Prozent der mittleren jährlichen Niederschlagssumme dieses Beobachtungsintervalles

Mean amount of annual precipitation in the case of minimal values of the so-called solar constant (BAUER, 1964) in the interval of 1–2 years before the occurrence of the minima of spots for the period 1921–73, expressed as percentages of the mean annual precipitation total of this observation interval

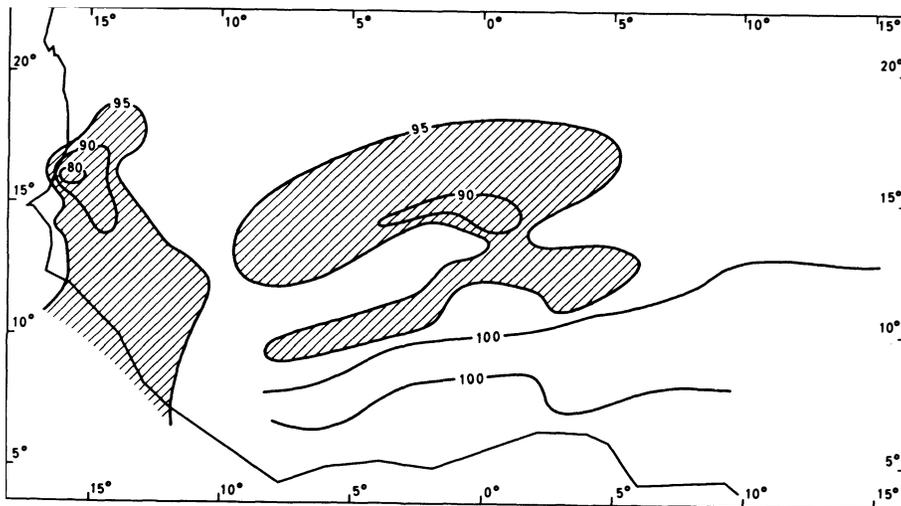


Abb. 4: Mittlere Höhe der jährlichen Niederschläge für den Fall maximaler Werte der sogenannten Solarkonstanten im Intervall 1–2 Jahre nach den Fleckenmaxima des Zeitraumes 1921–1973, ausgedrückt in Prozent der mittleren jährlichen Niederschlagssumme dieses Beobachtungsintervalles

Mean amount of annual precipitation in the case of maximal values of the so-called solar constant in the interval of 1–2 years after the maxima of spots of the period 1921–73, expressed as percentages of the mean annual total of this observation interval

den. Erwähnenswert ist allerdings, daß die katastrophale Dürre von 1968–1973, die durch maximale Niederschlagsdefizite im gesamten Sahelraum in den Jahren 1972/73 gekennzeichnet war, etwa drei Jahre nach einem Sonnenfleckmaximum (negativer Feldkapazität) im Jahr 1968.9 auftrat. In der absteigenden Phase der solaren Aktivitätsoszillation kam es ähnlich wie bei dem Fleckenmaximum negativer Feldkapazität im Jahr 1907.0 zu einem sekundären, kurzfristigen Anstieg der solaren Aktivität. Auch die Jahre 1911–1914/15 waren in der gesamten Sahelzone durchgängig durch katastrophale Niederschlagsdefizite ausgezeichnet. Abb. 4 bestärkt die Vermutung, daß hier solar-klimatische Beziehungen wirksam sind, die sich im wesentlichen durch eine Südabdrängung der ITC über Westafrika charakterisieren lassen. Es ist bekannt, daß die äquatorwärtige Verlagerung der mittleren ITC-Sommerposition in den Jahren 1972/73 Folge einer außergewöhnlichen Luftdruckabnahme im Bereich des St. Helena-Hochs bei gleichzeitiger Südabdrängung der nordhemisphärischen außertropischen Zirkulation im europäisch-atlantischen Sektor war. Weltweite Telekonnektionen, insbesondere in den Jahren 1972/73, sind ebenfalls vielfach erkannt und beschrieben worden, ohne daß eine schlüssige Erklärung all dieser synchron verlaufenden weltweiten Anomalien bisher gegeben werden konnte. Immer stärker rückt aber eine solar-terrestrische Ursachenverknüpfung ins Zentrum allgemeiner Erklärungsversuche.

Periodische Niederschlagsfluktuationen Westafrikas

Zur Regionalisierung der Areale Westafrikas, in denen der 11jährige Sonnenfleckenzklus besondere Wirksamkeit zeigt, wurden die jährlichen Niederschlagssummen von 78 Stationen für die Jahre 1921–1973 einer Varianzspektrumanalyse unterzogen. Die Methode (BLACKMAN und TURKEY, 1958) ist von MITCHELL (1966) einschließlich der erforderlichen Signifikanztests beschrieben worden. Nach diesen mathematischen Herleitungen wurde die Varianzspektrumanalyse für die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen in FORTRAN IV programmiert. Die Varianzspektrumanalyse zielt auf eine frequenzabhängige Aufteilung der in der zu untersuchenden Zeitreihe vorliegenden Gesamtvarianz. Im Falle einer rein zufälligen Verteilung der Gesamtvarianz auf die zugelassenen Frequenzbereiche ist eine Gleichverteilung der erklärten frequenzabhängigen Varianzanteile zu erwarten. Auf dieser Tatsache fußt der Signifikanztest im Falle eines stationären Gauß'schen Zufallsprozesses. Liegt hingegen einfache Markovpersistenz vor, die sich durch einen signifikanten Autokorrelationskoeffizienten bei einjähriger Zeitversetzung ausdrückt, so ist a priori eine höhere Varianzerklärung auf den langen Wellen (Perioden) zu erwarten. Der Vergleich mit dem theoretischen Varianzspektrum des roten Rauschens dient in diesem Falle zur Festlegung der Signifikanzgrenzen (MITCHELL, 1966).

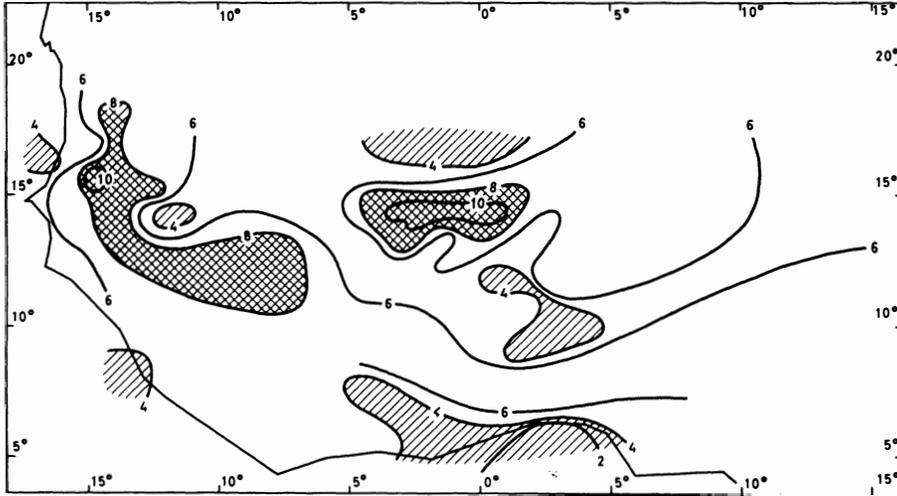


Abb. 5: Prozentualer Anteil an der Gesamtvarianz der jährlichen Niederschläge im Zeitraum 1921–1973, der durch eine ca. 10–12jährige Oszillation in der Zeitreihe der jährlichen Niederschlagssummen erklärt wird

Percentage share in the total variance of the annual precipitation in the period 1921–73, explained by an approximate 10–12 period of oscillation in the time series of the annual precipitation totals

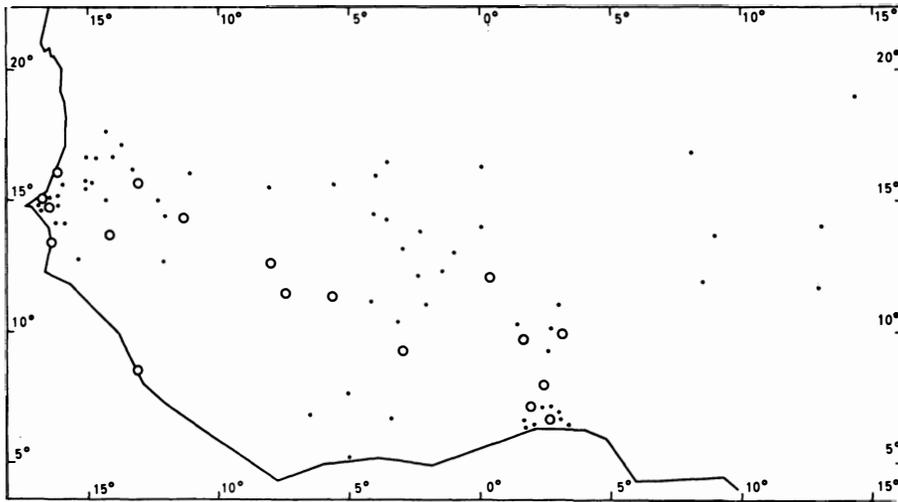


Abb. 6: Lage der berücksichtigten Stationen sowie die Lage der Stationen, deren Niederschlagszeitreihen durch einfache Markovpersistenz ausgezeichnet sind

Situation of the stations considered here as well as those of the precipitation time series distinguished by simple Markov-persistence

In Abb. 5 sind die auf einer 10- bis 12jährigen Periode erklärten Varianzanteile in ihrer räumlichen Verteilung dargestellt (Zahl der Beobachtungsjahre: 52; maximale Zeitversetzung: 17 Jahre). Abb. 6 zeigt die Lage der berücksichtigten Stationen sowie die Lage der Stationen, deren Niederschlagszeitreihen durch einfache Markovpersistenz ausgezeichnet sind.

Im Bereich des 15. nördlichen Breitenkreises heben sich zwei Areale hoher erklärter Varianzanteile ab. Eines davon liegt etwa in 15° W, das zweite zwischen 5–0° W. Rund 12% der Gesamtvarianz müssen auf

dem Periodenintervall 10–12 Jahre erklärt werden, wenn die Signifikanzgrenze (5%) erreicht werden soll. Diese Bedingung wird an einer Station im Senegal (Bakel) und an drei Stationen in dem Areal 5–0° W erfüllt. Die Zeitreihen von 74 Stationen genügen den Signifikanzforderungen nicht, erklären aber in der Regel weit mehr als 6% der Gesamtvarianz auf der 11jährigen Periode. Bei reiner Gleichverteilung der Gesamtvarianz auf alle zugelassenen Frequenzen wären 6% der Gesamtvarianz auf der ca. 11jährigen Periode zu erwarten.

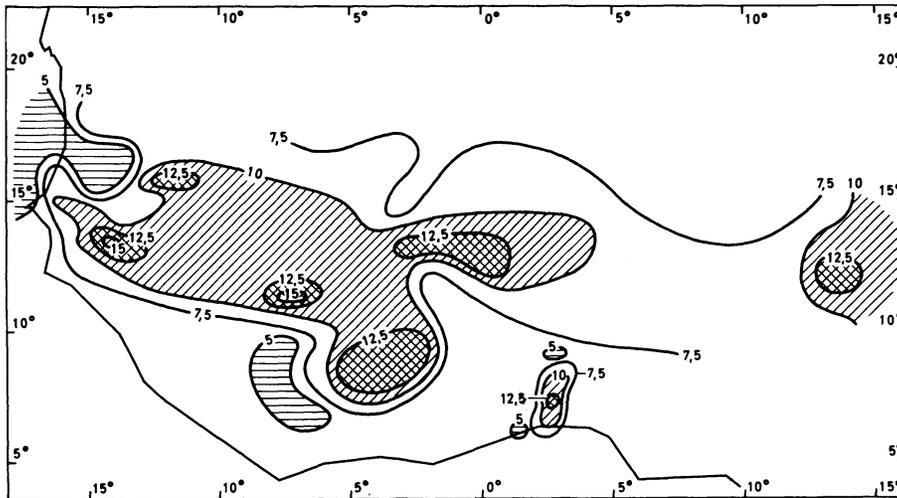


Abb. 7: Prozentualer Anteil an der Gesamtvarianz der jährlichen Niederschlagssummen im Zeitraum 1921–1973, der durch eine ca. 18–22jährige Oszillation in der Zeitreihe der jährlichen Niederschlagssummen erklärt wird

Percentage share in the total variance of annual precipitation totals in the period 1921–73, which is explained by an approximately 18–22 year period of oscillation in the time series of the annual precipitation totals

Von besonderem Interesse ist die Tatsache, daß offenbar die 11jährige Periodizität in den Zeitreihen des jährlichen Niederschlags mit zunehmender Meeresdistanz wächst. Minimale Varianzanteile werden im Bereich der Guineaküste aber auch, soweit die wenigen homogenen Stationszeitreihen eine derartige Aussage zulassen, am Südsaum der Sahara erklärt. Im ersten Falle dürfte die relative Beständigkeit der ITC-Migration im Guinea-Küstenbereich wirksam werden, im letzteren hingegen die große Variabilität der jährlichen Niederschlagssummen nicht unbedeutend sein.

Zusammenfassend zeigt das Raummuster der durch die Varianzspektrumanalyse frequenzabhängig aufgeteilten Gesamtvarianz der jährlichen Niederschlagssummen, daß einige Gebiete Westafrikas signifikant die Periodizität des einfachen Sonnenfleckenzklus nachzeichnen.

Während BAUR (1959) eine Doppelwelle der Intensitätsschwankungen der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation im Ablauf des Sonnenfleckenzklus belegt, kann WILLETT (1974) nachweisen, daß der 22jährige doppelte Sonnenfleckenzklus gerade für die tropischen Niederschlagsvariationen von übergeordneter Bedeutung ist. Die Kürze der hier analysierten Zeitreihen gestattet keine genaue Fixierung der 22jährigen Periode. Vielmehr erfolgt die Varianzaufteilung durch die Varianzspektrumanalyse derart, daß die in Abb. 7 angegebenen erklärten Varianzanteile sich auf das relativ breite Periodenband von 18–22 Jahre beziehen. Die wenigen Niederschlagsreihen, die für längere Zeiträume homogenisiert werden konnten, werden einer getrennten Varianzspektrumanalyse unterzogen. Es wird eine Analyse der ca. 22jährigen Periode auf

der Basis der leider sehr kurzen (52 Jahre) 78 Zeitreihen versucht. Die Ergebnisse sind unter diesem Vorbehalt zu bewerten.

Zellenförmig heben sich mit 12,5% erklärten Anteils der Gesamtvarianz einige Areale signifikant (5%) aus dem Raummuster der erklärten Varianzanteile aller Stationen (Abb. 7) ab. Der Vergleich mit Abb. 6 zeigt, daß die Gebiete maximaler erklärter Varianzanteile nur teilweise mit den Räumen koinzidieren, in denen einfache Markovpersistenz der Zeitreihen belegt ist. Soweit diese räumliche Koinzidenz zutrifft, liegt keine Signifikanz vor, da die Persistenz eine Kumulation der erklärten Varianzanteile auf den langen Wellen auslöst.

Der Vergleich von Abb. 5 und 7 zeigt, daß in der Tat die ca. 22jährige Periodizität, soweit sie durch das weite Periodenband 18–22 Jahre erfaßt wird, eine entscheidendere Rolle für die Fluktuationen der jährlichen Niederschlagssummen Westafrikas spielt, als die 11jährige Periode. Die Areale, die durch maximale erklärte Varianzanteile auf der 11- bzw. 22jährigen Periode ausgezeichnet sind, fallen räumlich nur ausnahmsweise zusammen. An Hand der Abb. 5 und 7 könnte geschlossen werden, daß beide Periodizitäten durch recht unterschiedliche Wirkungsmechanismen der tropischen Zirkulation bedingt werden. Es ist besonders auffallend, daß im inneren Migrationsbereich der ITC wiederholt eine signifikante ca. 22jährige Periodizität der jährlichen Niederschlagssummen nachweisbar ist, die beim 11jährigen Niederschlagszyklus in diesem Raum völlig fehlt. Es ist bekannt, daß die zeitlichen Fluktuationen der Gewitterhäufigkeiten in mittleren und hohen Breiten eng mit dem doppelten Sonnenfleckenzklus verknüpft sind. Möglicherweise

faßt Abb. 7 dieses Phänomen für Teile der inneren Tropenzone. Eine ca. 22jährige periodische Intensitätsschwankung des Luftdrucks im Bereich der subtropischen Hochdruckgebiete, die wiederholt beschrieben wurde, dürfte zur Erklärung ebenfalls beitragen. Eine endgültige Begründung der hier aufgezeigten räumlichen Verteilungsmuster der 11- und 22jährigen Fluktuationen der jährlichen Niederschlagssummen erfordert das interdisziplinäre Zusammenarbeiten von Klimatologen, Meteorologen, Solar- und Geophysikern.

Theoretisch hergeleitete Zeitreihe der ITC-Migrationen

In der Tropenzone bringen Gebietsmittelwerte der jährlichen Niederschlagssummen die Variationen der tropischen Zirkulation bedeutend besser zum Ausdruck, als die Niederschlagszeitreihen einzelner Stationen (SCHUPPELIUS, 1976). Die zeitlichen Fluktuationen der tropischen Zirkulation werden in guter Näherung durch die ITC-Wanderungen über Westafrika beschrieben. Hohe jährliche Niederschlagssummen in den äquatorfernen Gebieten Westafrikas sind mit einer weiten polwärtigen Migration der ITC verbunden (THOMPSON, 1965). Dementsprechend stellt die polwärtige Abnahme der jährlichen Niederschlagssummen über Westafrika ein Maß für die Nordwanderung der ITC dar. Je größer der meridionale Niederschlagsgradient, um so geringer ist die Äquatordistanz der nördlichsten Lage der ITC.

Dieser Zusammenhang wird durch Abb. 8 bestätigt. Für jeweils 5° breite Meridionalstreifen wurden die jährlichen Niederschlagssummen in Abhängigkeit zur geographischen Breite ihres Auftretens für die Jahre 1921–1972 einer linearen Regressionsanalyse unterzogen. Für zwei Meridionalstreifen sind die Korrelationskoeffizienten sowie die geographischen Breiten angegeben, in denen die jährlichen Niederschlagssummen theoretisch gemäß der Regression gleich Null werden. Diese Breite liegt zwar nicht mehr im Definitionsintervall der empirischen Werte, die die Regressionsgleichung bestimmen, variiert aber meridional in völliger Parallelität zur Breitenabhängigkeit des Niederschlags im Definitionsintervall.

Besonders im Meridionalsektor 2° W–5° E wird ein Zusammenhang zwischen dem Korrelationskoeffizienten und der geographischen Breite der theoretischen Omm-Jahresisohyete deutlich. Die Korrelationskoeffizienten sind dann besonders klein, wenn die polwärtige ITC-Lage in hohen nördlichen Breiten beobachtet wird. Das ist klimatologisch zu erwarten, da im Falle einer weit nordwärts verlagerten ITC die äquatornahen Gebiete Westafrikas (Guineaküste) unter den Einfluß der St. Helena-Höhenantizyklone geraten. Die in dieser Höhenantizyklone absteigenden Luftmassen bewirken eine Niederschlagsdämpfung im Guinea-Küstenraum und den nördlich anschließenden Gebieten (THOMPSON, 1965). Niederschlagsdefiziten im Guinea-Küstenraum stehen aber in der Regel Über-

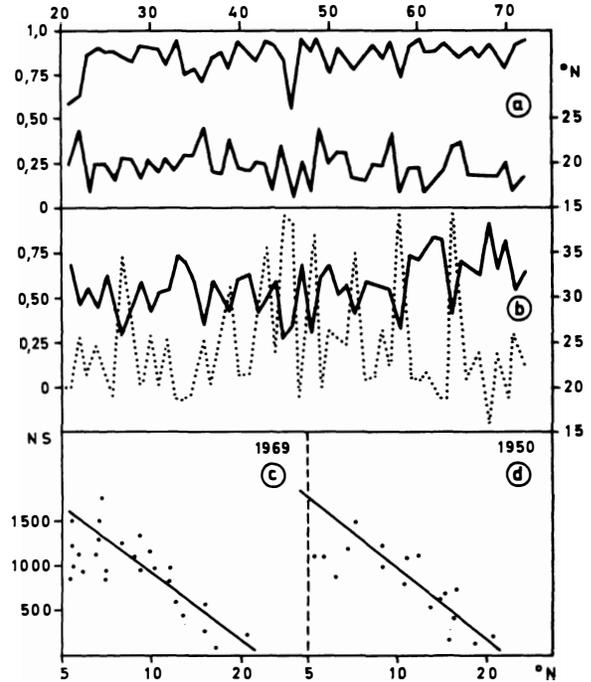


Abb. 8: Die theoretisch bestimmten Fluktuationen der ITC im Meridionalstreifen 7–2° W und 2° W–5° E

- a) obere Kurve: Korrelationskoeffizient der Beziehung zwischen geographischer Breite und Höhe der jährlichen Niederschlagssumme im Meridionalstreifen 7–2° W; untere Kurve: Geographische Breite des Auftretens der Null-Millimeter Isohyete im Meridionalstreifen 7–2° W;
- b) durchgezogen: Korrelationskoeffizient für 2° W–5° E; punktiert: Geographische Breite für 2° W–5° E;
- c) lineare Regression für das Jahr 1969 zwischen geograph. Breite und Höhe des Jahresniederschlags für 2° W–5° E ($r = -0.64$);
- d) wie c) für das Jahr 1950 und 7° W–2° W ($r = -0.76$)

The theoretically confined fluctuations of the ITC in the meridional strip 7–2° W and 2° W–5° E

- a) upper curve: correlation co-efficient of the relationship between geographical latitude and the amount of annual precipitation in the meridional strip 7–2° W; lower curve: geographical latitude of the occurrence of the zero millimetre isohyet in the meridional strip 7–2° W;
- b) continuous line: correlation co-efficient for 2° W–5° E; dotted line: geographical latitude for 2° W–5° E;
- c) linear regression in the year 1969 between the geographical latitude and amount of annual precipitation for 2° W–5° E ($r = -0.64$);
- d) as in c) for the year 1950 and 7° W–2° E ($r = -0.76$)

schüsse in 15–20° N gegenüber. Offensichtlich wird dadurch die Linearität der Beziehung zwischen geographischer Breite und Höhe der jährlichen Niederschlagssumme durchbrochen.

Die so bestimmten jährlichen geographischen Auftretsbreiten der theoretischen Omm-Jahresisohyete des

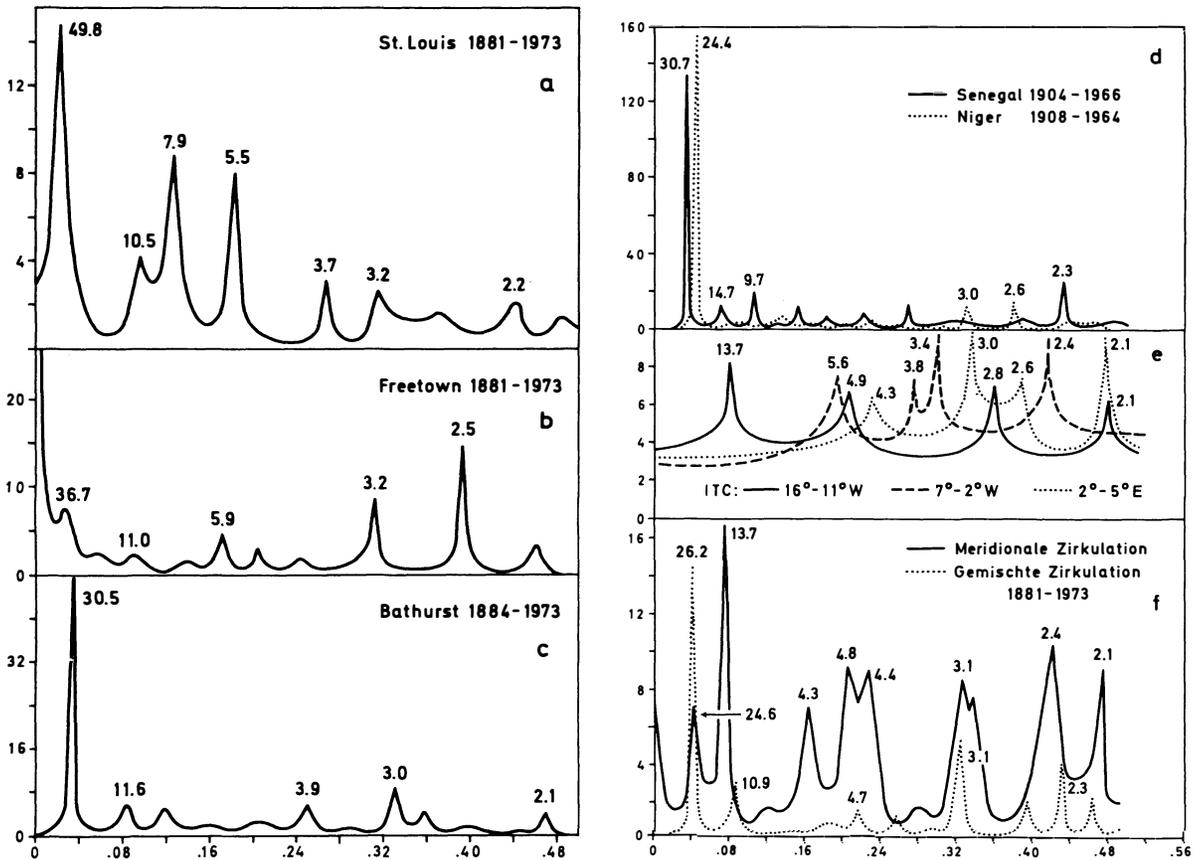


Abb. 9: Varianzspektren einiger ausgewählter westafrikanischer Stationen (a, b, c), der Abflußdaten des Senegals und Nigers (d), der theoretisch bestimmten ITC-Migrationen (e) und der gemischten bzw. meridionalen GWL-Häufigkeiten Europas (f)

Variance spectra of some selected West African stations (a, b, c), the discharge data of the Senegal and Niger rivers (d), the theoretically-determined ITC movements (e) and the mixed, or rather meridional GWL frequencies of Europe (f)

Zeitraumes 1921–1972 wurden für die jeweils 5° – 7° breiten Meridionalstreifen getrennt einer Varianzspektrumanalyse unterzogen. Die Ergebnisse sind in generalisierter Form in Abb. 9 dargestellt. Ganz offensichtlich treten in unterschiedlichen Meridionalektoren auch unterschiedliche Periodizitäten der ITC-Wanderungen auf. Eine starke Häufung hoher erklärter Varianzanteile ist im 2- bis 3- und 4,3- bis 5,6-jährigen Periodenintervall erkennbar. Signifikant tritt nur im Bereich der atlantischen Westküste eine 13,7-jährige Periode durch hohe erklärte Varianzanteile in Erscheinung. Eine 11- oder 22-jährige Periode fehlt, drückt sich aber möglicherweise in der 5,6-jährigen Periode, die als Harmonische (Oberwelle) der 11- bzw. 22-jährigen Periode gesehen werden kann, aus.

Abflußdaten des Senegals und Nigers

Besser als die theoretisch hergeleiteten ITC-Migrationen kommen die langfristigen großräumigen Niederschlagsvariationen in den Abflußänderungen der

großen westafrikanischen Flüsse zum Ausdruck. Für den Senegal und den Niger wurden die an den Stationen Bakel bzw. Konlikoro gemessenen jährlichen Abflußwerte einer Varianzspektrumanalyse (MESA) unterzogen (Abb. 9). Die Ergebnisse weisen hohe, signifikante erklärte Varianzanteile auf einer ca. 30- und 24-jährigen Periode aus. Ähnliche Periodizitäten sind wiederholt für die Niederschlagsvariationen Westafrikas beschrieben worden (PARIS-TEYNAC, 1963; KLAUS, 1975). Geophysikalische Oszillationen dieser Periodenlänge sind nicht bekannt; die 13,7-jährige Periode der ITC-Fluktuationen kann aber wahrscheinlich im Rahmen der Analysegenauigkeit als Harmonische der ca. 30-jährigen Periode gedeutet werden.

Die Periodizität der außertropischen Zirkulation

Die außertropische Zirkulation im atlantisch-europäischen Sektor läßt sich durch die jährlichen Häufigkeiten der Großwetterlagen Europas beschreiben (HESS, BREZOWSKY, 1969). Der deutsche Wetterdienst

in Offenbach stellte freundlicherweise für den Zeitraum 1881–1973 die täglich klassifizierten GWL auf Magnetband zur Verfügung. Die Jahressummen der GWL wurden für diesen Zeitraum nach zonalen, meridionalen und gemischten Zirkulationsformen zusammengestellt. Infolge der Kürze der Zeitreihen war eine scharfe Trennung der interessierenden langen Perioden hoher Varianzerklärung nur unzulänglich möglich. Ein in der Geophysik im Laufe der letzten Jahre viel angewandtes neues Verfahren (Maximum Entropy Spectrum Analysis, MESA, Burg, 1975) zur frequenzabhängigen Varianzaufteilung wurde nach der mathematischen Herleitung von ULRICH und BISHOP (1975) in einer Modifikation, die FOUGERE et al. (1976) vorschlagen, programmiert und zur Bestimmung aller in Abb. 9 angegebenen Varianzspektren angewandt.

Für die jährlichen Häufigkeiten der gemischten und meridionalen Zirkulationsform ist in Abb. 9 das nach dieser neuen Methode bestimmte Varianzspektrum der Jahreshäufigkeiten dargestellt. Trotz der Kürze der Zeitreihe heben sich die Maxima der frequenzabhängigen Varianzaufteilung scharf aus den Gesamtspektrum ab. Die in den Abflußdaten der westafrikanischen Flüsse nachgewiesene 24- und 30jährige Periode ist im Varianzspektrum der gemischten Zirkulationsform ebenfalls durch die 26jährige Periode näherungsweise ausgebildet. Die 13,7jährige Periode der ITC-Migrationen findet im Spektrum der meridionalen GWL ein ausgeprägtes Pendant maximaler erklärter Varianzanteile auf dieser Periode.

Die gemischte Zirkulationsform ist durch eine nordwärtige Verlagerung der atlantisch-europäischen Frontalzone gekennzeichnet (SCHUURMANS, 1969). Dadurch gewinnt die tropische Zirkulation beim Auftreten gemischter Zirkulationsformen über Europa polwärts an Raum. Die nordwärtigen Wanderungen der ITC über Westafrika werden also nicht von Norden her durch die außertropische Zirkulation vorzeitig abgeblockt, wie es in den extremen Dürre Jahren 1972/73 der Fall war.

Auch im Varianzspektrum der Häufigkeiten meridionaler Zirkulationsstrukturen tritt eine 24,6jährige Periode in Erscheinung. Hochsignifikant ist aber die 13,7jährige Periode ausgebildet, die die ITC-Fluktuationen im Bereich der senegalesisch-mauretanischen Küstenzone kennzeichnete. Auch die ca. 4jährige und 2- bis 3jährige Periode findet sich in den Varianzspektren der GWL-Häufigkeiten wieder.

In Abb. 9 sind die nach der Maximum Entropy Spectrum-Analyse gewonnenen Varianzspektren der Stationen Westafrikas zusammengestellt, deren Zeitreihen des Niederschlags besonders weit in die Vergangenheit zurückreichen. Keiner der in Abb. 9 festgestellten Zyklen ist hier signifikant nachweisbar. Das kann ein Beleg für die Nichtstationarität der Zeitreihen sein, wahrscheinlich spiegeln aber die Einzelstationen, wie schon betont wurde, die großräumigen

Fluktuationen der tropischen Zirkulation nur sehr unzulänglich wider.

Tropischer Niederschlag und doppelter Sonnenfleckenzyklus

Zur Überprüfung der Hypothese eines Zusammenhangs zwischen dem doppelten Sonnenfleckenzyklus und der Höhe der jährlichen Niederschlagssummen in Westafrika, wurden die jährlichen Niederschlagssummen der 78 in Abb. 6 angeführten Stationen auf Jahresbasis für den Zeitraum von 1921–1973 den Phasen des doppelten Sonnenfleckenzyklus zugeordnet. Die Mittelbildung über die zeitlich so erfaßten doppelten Sonnenfleckenzyklen gestattet die Kennzeichnung der mittleren jährlichen Niederschlagsfluktuationen in Abhängigkeit von den Phasen des doppelten Sonnenfleckenzyklus. Die so gebildeten mittleren 22jährigen Zeitreihen der 78 Stationen wurden einer zweimaligen binomialen Filterung (1,2,1) unterworfen (HOLLOWAY, 1958). Anschließend wurde in den so gefilterten Zeitreihen die Lage des absoluten und sekundären Minimums bzw. Maximums in Abhängigkeit zu den Jahresphasen des doppelten Sonnenfleckenzyklus bestimmt. Drei Stationen wurden in dieser Analyse eliminiert, so daß insgesamt 150 Maxima und Minima ausgezählt werden konnten. Abb. 10 zeigt die Häufigkeit des Auftretens absoluter und sekundärer Maxima bzw. Minima für die 75 Stationen Westafrikas in Abhängigkeit zu den jährlichen Phasen des doppelten Sonnenfleckenzyklus.

In Abb. 10 ist gleichfalls der mittlere Verlauf des doppelten Sonnenfleckenzyklus nach zweimaliger binomialer Filterung angegeben. Es wird deutlich, daß die Häufigkeitsmaxima und Minima gehäuft in bestimmten Phasen des doppelten Sonnenfleckenzyklus auftreten. Maximale Stationshäufigkeiten für die maximalen jährlichen Niederschlagssummen können bevorzugt bei m^+ (Minimum positiver Feldkapazität) und dem Anstieg zu M^+ (Maximum positiver Feldkapazität) an den Stationen Westafrikas beobachtet werden. Dabei ist das Jahresintervall vor und nach m^+ durch vergleichsweise geringe Niederschlagssummen an einer Vielzahl von Stationen gekennzeichnet. Die Stationshäufigkeiten liegen hier unter der Grundwahrscheinlichkeit. Minimale Niederschlagssummen treten bevorzugt in der nach m^- (Minimum negativer Feldkapazität) abfallenden und in der nach M^- (Maximum negativer Feldkapazität) ansteigenden Phase solarer Aktivitätsschwankungen auf. Ausgehend von einer Grundwahrscheinlichkeit von 4,54% sind die Häufigkeiten der Stationen mit maximalen Niederschlagshöhen bei m^+ mit erheblich weniger als 1%iger Irrtumswahrscheinlichkeit nicht mehr durch Zufall erklärbar (KOLLER, 1969, p. 45). Die Häufigkeitsspitzen beim Auftreten der minimalen Niederschlagssummen sind nur mit 5%iger Irrtumswahrscheinlichkeit zu belegen. Eine hochsignifikante Zunahme der Häufigkeit tropischer Störungen darf

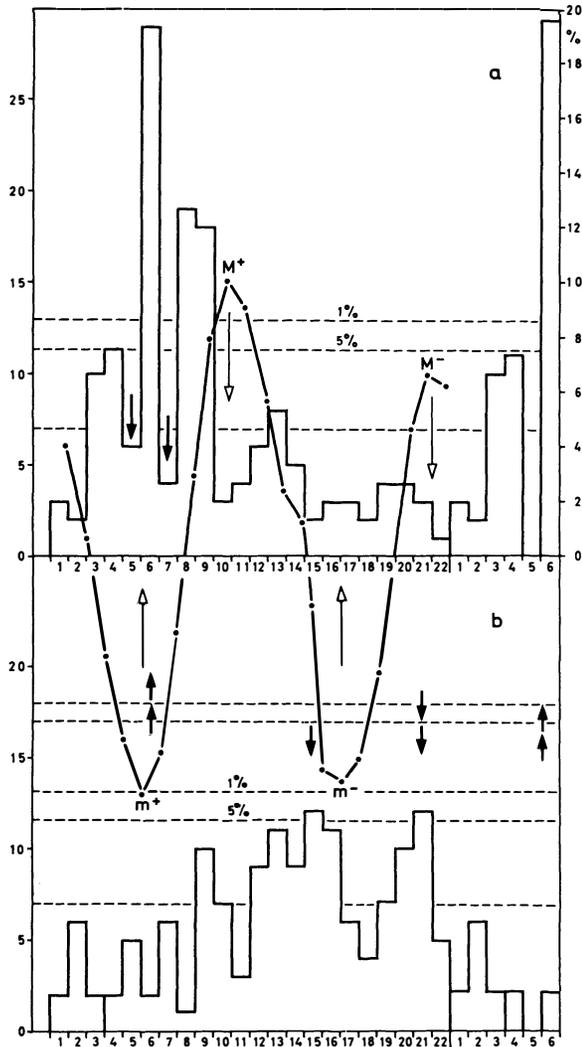


Abb. 10: Zahl der Stationen Westafrikas südlich der Sahara mit maximalen bzw. minimalen (absolute und sekundäre) mittleren jährlichen Niederschlagssummen im Ablauf des doppelten Sonnenfleckenzyklus, ausgedrückt in Prozent der Gesamtzahl

Number of West African stations south of the Sahara with maximal or minimal (absolute and secondary) mean annual precipitation totals during the course of the double sunspot cycle, expressed as percentages of the total figure

also in Jahren mit minimaler solarer Aktivität positiver Feldkapazität als gesichert angenommen werden. Offensichtlich sind aber die positiven als auch die negativen Abweichungen der Niederschlagssummen vom Mittelwert an den 75 Stationen Westafrikas so gering, daß sich die 22jährige Periode in den Varianzspektren der oben analysierten Zeitreihen nicht ausbildet.

In Abb. 10 sind die potentiellen zeitlichen Abfolgen der Maxima und Minima in der Häufigkeitsauszählung der Stationszeitreihen angegeben. Periodizitäten von 7, 9, 13, 15 Jahren können danach in Westafrika im Ablauf des doppelten Sonnenfleckenzyklus erwartet werden. Die 9jährige Periode dürfte dabei in der für einige Stationen nachgewiesenen 10- bis 11jährigen Periode aufgehen, die 13jährige Periode könnte in den zeitlichen Fluktuationen der ITC-Migrationen belegt sein, während die 7jährige Periode im Varianzspektrum des Senegalflusses (6,9 Jahre) zu erkennen ist.

Schlußbemerkungen

Diese Untersuchungen haben gezeigt, daß fraglos durch Zufall nicht mehr erklärare Beziehungen zwischen der Höhe der jährlichen Niederschläge in Teilen Westafrikas und den Schwankungen der solaren Aktivität bestehen. Wirkungen des 11- und 22jährigen Sonnenfleckenzyklus können belegt werden, sind aber im Vergleich zu anderen periodischen Variationen der jährlichen Niederschlagssummen so gering, daß sie für prognostische Zwecke von regional begrenzten Ausnahmen abgesehen nicht zu nutzen sind. Die Interpretation der räumlichen Verteilungsmuster aller auf einer 11- bzw. 22jährigen Periode erklärten hohen Varianzanteile bietet aber die Möglichkeit, die Wirkungsmechanismen solar-troposphärischer Beziehungen für die tropischen Breiten schärfer als bisher geschehen zu fassen.

Literatur

- BAUR, F.: Neue Untersuchungsergebnisse über die Zusammenhänge des Großwetters mit dem Sonnenfleckenzyklus. *Geofisica pura e Appl.*, Vol. 44/3, 1959, p. 303-314.
- : Ist die sogenannte Solarkonstante wirklich konstant? *Meteorol. Rundschau*, Vol. 17/1, 1964, p. 19-25.
- BLACKMAN, R. B. und TURKEY, J. W.: *The Measurement of Power Spectra*. Dover, New York, 1958.
- BURG, J. P.: *Maximum entropy spectral analysis*. Ph. D. Thesis, Stanford, Palo Alto, Calif., 1975.
- DORIZE, L.: L'oscillation climatique actuelle au sahara. *Revue de Géographie physique et de Géologie Dynamique*, Vol. 28/2-3, 1976, p. 217-228.
- DZERDZEYEVSKIY, B. L.: Basic Problems of Climate formation, variability of climatic regimes, and Atmospheric-solar relations. In: *Meteorology and Climate*, Ed.: DANILINA, I. P. und KAPITSA, A. P., Boston/Mass., 1974.
- FOUGERE, P. F.; ZAWALICK, E. J.; RADOWSKI, R. H.: Spontaneous line splitting in Maximum Entropy Power Analysis. *Phys. of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 12, 1976. - Sonderdruck ohne Seitenangabe. -
- HESS, P.; BREZOWSKY, H.: *Katalog der Großwetterlagen Europas*. Berichte des deutsch. Wetterdienstes, Vol. 15/113, 1969.
- HOLLOWAY, J. L.: Smoothing and filtering of time series and space fields. In: *Advances in Geophysics*, Vol. 4, New York 1958, 1958.

- KLAUS, D.: Niederschlagsgenese und Niederschlagsverteilung im Hochbecken von Puebla-Tlaxcala. Bonner Geogr. Abhandlg. Vol. 54, 1976.
- : Periodische und statistische Beziehungen zwischen den jährlichen Häufigkeiten der Großwetterlagen Europas und der räumlichen Verteilung der jährlichen Niederschlagssummen in Teilen Westafrikas. Erdkunde, Vol. 29/4, 1975. p. 248–267.
- KOLLER, S.: Neue graphische Tafeln zur Beurteilung statistischer Zahlen. Darmstadt, 1969.
- LIPOVKA, A. V.: Certain Patterns in the Transformations of atmospheric circulation Forms in the Southern Hemisphere as related to Solar Activity Variations. Inform. Byal. Sov. Antarkt. Ekspeditsii, No. 75, 1970, p. 15–23.
- MALEY, J.: Un nouveau mécanisme des changements climatiques aus basses latitudes. Ass. Sénégal et Quartn. Ouest afr., Bull. Liaison, Senegal, No. 37/38, 1973, p. 31–40.
- MITCHELL, J. M.: Climatic Change. WMO-Technical Note No. 79, 1966.
- PARIS-TEYNAC, E. J.: Contribution à la connaissance des fleuves d'Afrique tropicale et en particulier du Nil. Les crues exceptionnelles, Bulletin de l'IFAN, Vol. 25, Ser. A, No. 1, 1963, p. 1–23.
- RIEHL, H.: Tropical Meteorology, New York, Toronto, London, 1954.
- SCHUPELIUS, G. D.: Monsoon rains over West Africa. Tellus Vol. 28/6, 1976, p. 533–536.
- SCHUURMANS, C. J. E.: The Influence of solar flares on the tropospheric Circulation. Medelingen en Verhandelingen No. 92, s-Gravenhage, 1969.
- THOMPSON, B. W.: The Climate of Africa. Oxford University Press, Nairobi – London – New York, 1965.
- ULRYCH, T. J.; BISHOP, T. N.: Maximum Entropy Spectral Analysis and Autoregressive Decomposition. Rev. Geophys. and Space Physics, Vol. 13/1, 1975, p. 183–200.
- WILLETT, H. C.: Recent statistical Evidence in support of predictive significance of solar-climatic cycles. Monthly Weather Rev., Vol. 102, 1974, p. 679–686.

DIE SÜDANDINE UND DIE SÜDBRASILIANISCHE ARAUKARIE

Ein ökologischer Vergleich¹⁾

Mit 7 Abbildungen, 7 Photos und 2 Tabellen

WINFRIED GOLTE

Summary: The southern Andean and southern Brazilian Araucaria – an ecological comparison.

There are two species *Araucaria* conifers in South America (Fig. 1): *A. araucana* in the central section of the southern Andes, *A. angustifolia* in southern Brazil. In view of the great similarity and close systematic relationship of both species on the one hand, and the seeming difference of their climatic conditions on the other hand, the question arises as to the common ecological characteristics of the two areas of occurrence, which are decisive for their flourishing. It appeared that the annual hygric course of both areas was in agreement. A very humid season alternates with another one of irregular precipitation and frequent dry weather, which has prolific radiation. In both the regions the hygric seasons carry on an inverse relationship as regards the thermal seasons: in the area in which *A. araucana* occurs, episodic dryness in summer and in the larger part of the area in which *A. angustifolia*, episodic dryness in winter. It is demonstrated that both species of *Araucaria* are adapted to these climatic conditions, not only thanks to their xeromorphic habit, but also as a result of an endogenic rhythm synchronized primarily with the hygric seasons. This endogenic rhythm finds its expression in the growth periodicity (annual growth rings) and the reproductive cycle (seed formation).

Zwei der insgesamt 19 lebenden *Araucaria*-Arten sind in Südamerika heimisch (Abb. 1): *Araucaria araucana* (MOL.) K. KOCH beiderseits der chilenisch-argentinischen Grenze im Mittelabschnitt der südlichen Anden und *Araucaria angustifolia* (BERT.) O. KUNTZE im südlichen Brasilien (mit einem Ausläufer im argentinischen Territorium Misiones). Die beiden Verbreitungsgebiete sind rund 2000 km voneinander entfernt und von recht unterschiedlicher Größe. Läßt sich das ursprünglich von *A. araucana* bedeckte Gebiet auf etwa 4000 km² veranschlagen, so dürfte dasjenige von *A. angustifolia* mit ungefähr 200 000 km² (vgl. HUECK 1966) um ein Vielfaches größer gewesen sein. Das Klima (vgl. TROLL & PAFFEN 1964) im Bereich der südandinen Art kann als subtropisch bis kühl-gemäßigt mit überwiegenden Winterniederschlägen, das Klima des südbrasilianischen Araukariengebietes hingegen als subtropisch bis randtropisch mit (im größten Teil) überwiegenden Sommerniederschlägen bezeichnet werden. Trotz der weit getrennten Lage der Areale auf der West- bzw. Ostseite des Kontinents mit ihren klimatischen Unterschieden sind beide Arten einander recht ähnlich und gehören auch in der Systematik eng zusammen.

A. araucana und *A. angustifolia* sind stattliche, jeweils – um die Extreme zu nennen – bis zu 50 m hohe und 2,50 m BHD starke Bäume, deren kerzengerader, säulenförmiger Stamm und strenge, wirtelige Verzweigung ihnen eine „mathematische“ Schönheit ver-

¹⁾ Vorliegender Aufsatz stellt die etwas erweiterte schriftliche Fassung eines Vortrages dar, den der Verfasser am 21. Mai 1977 auf dem VIII. Symposium „Biogeographische und landschaftsökologische Probleme Südamerikas“ in Saarbrücken gehalten hat.