

PERIODISCHE UND STATISTISCHE BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN  
JÄHRLICHEN HÄUFIGKEITEN DER GROSSWETTERLAGEN  
EUROPAS UND DER RÄUMLICHEN VERTEILUNG  
DER JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN TEILEN WESTAFRIKAS

Mit 13 Abbildungen und 5 Tabellen

DIETER KLAUS

*Summary:* Periodic and statistical linkages between the annual frequency of major circulation types in Europe and the spatial distribution of annual precipitation totals in parts of West Africa.

Between 1967 and 1973 substantial increases in the frequency of meridional circulation types in the summer months were observed. There could have led to a decline in precipitation in the subtropics which was as statistically significant for some parts of West Africa as the occurrence of above-average annual precipitation totals in the Sahel area when mixed circulation forms predominate over Europe.

The frequency distributions of annual precipitation totals in West Africa show spatial patterns which can be explained over a long period in terms of alternation between the monsoon and harmattan regimes. The deviations of the frequency distributions from a normally distributed structure show changes which are dependent on geographical longitude.

The time series of major circulation types in Europe and the time series of a number of West African stations were studied by spectral analysis. This showed the working of the 'Southern Oscillation' of the sunspot cycle and a 18–23 year period. Cross-correlation and coherences analyses indicated a 30 year period, also apparently indicated by the historically-attested occurrence of droughts in the Sahel.

Die Länge des heute vorliegenden Beobachtungszeitraumes einiger Klimaparameter gestattet den Vergleich von Teilperioden. Es zeigt sich, daß neben den jahreszeitlichen Änderungen der allgemeinen Zirkulation über mehrere Jahre anhaltende gegenüber dem Mittel veränderte Zirkulationsbedingungen auftreten. Dabei bleibt offen, ob diese Abweichungen von den mittleren Verhältnissen eine im statistischen Sinne signifikante Periodizität aufweisen und inwieweit sich ihre Wirkung über eng begrenzte Beobachtungsräume hinaus auswirken.

Für die Großwetterlagen Europas liegen 93jährige Beobachtungsreihen vor. Diese Wetterlagenklassifizierung stellt keine objektive Charakteristik der allgemeinen Zirkulation im europäischen Sektor dar. Die signifikante Korrelation der Häufigkeiten der Großwetterlagen mit einer Vielzahl objektiv gemessener Parameter (CAPPEL 1975) zeigt aber, daß die Großwetterlagen (GWL) eine gute approximative Beschreibung der Zirkulationsverhältnisse im europäischen Quadranten liefern.

In dieser Arbeit werden Häufigkeiten der GWL für Teilperioden verglichen, auf vorliegende Periodizitäten untersucht und in Beziehung zu den jährlichen Niederschlagssummen in Westafrika gesetzt.

*Die Auftrittshäufigkeit der GWL für Teilzeiträume*

In Abb. 1 sind die Häufigkeiten meridionaler GWL für die Sommer- und Wintermonate dargestellt. Der Vergleich der Periode 1967–1973 mit den vorangehenden Teilzeiträumen zeigt eine im bisherigen Beobachtungsintervall nicht bekannte Häufigkeitszunahme meridionaler Wetterlagen insbesondere in den Sommermonaten. Die jährlichen Niederschlagssummen in Dakar (Abb. 1) und anderen senegalesischen Stationen

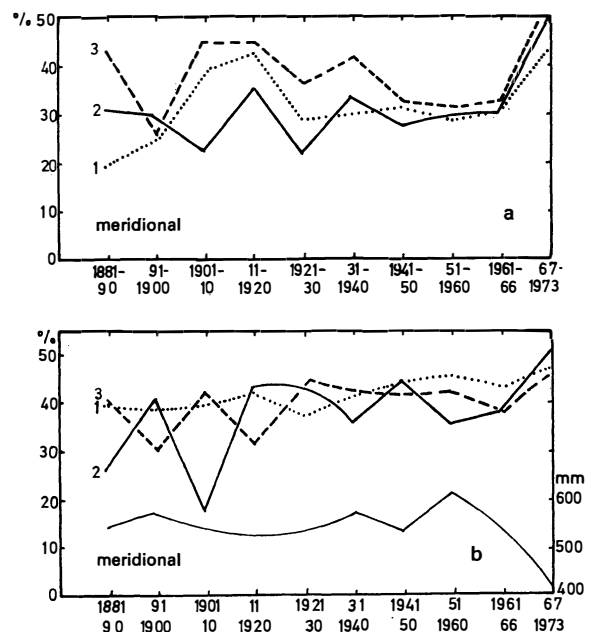


Abb. 1: Prozentuale Auftrittshäufigkeit meridionaler Wetterlagen in den Sommermonaten (a) und den Wintermonaten (b). Zehnjahresmittel nach HESS und BREZOWSKY, 1969; Siebenjahresmittel nach eigener Auszählung der „Großwetterlagen Europas, Amtsblatt des Deutsch. Wetterdienstes, Jahrgang 20–26“

1 Juli (a), Dezember (b); 2 August (a), Januar (b); 3 September (a), Februar (b)

Percentage frequency of occurrence of meridional circulation types in summer months (a) and winter months (b). Ten year mean after HESS and BREZOWSKY, 1969; seven year mean from author's calculation of "Major circulation types in Europe, Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes, Volumes 20–26" (Official Journal of the German Weather Service)

zeigen einen dazu inversen Verlauf. Die Häufigkeiten der meridionalen Südgroßwetterlagentypen (SA, SZ, TB, TRW) korrelieren negativ signifikant ( $r = -0.2734$ , Irrtumswahrscheinlichkeit: 5%) mit den jährlichen Niederschlagssummen von Saint Louis (16.01 N, 16.30 W) im Zeitraum 1918–1973. Gleiches gilt für die gemischten Wetterlagen SWA und SWZ ( $r = -0.2824$ , Irrtumswahrscheinlichkeit: 5%), während die gemischten Wetterlagen NWA und NWZ eine positive Korrelation ausweisen.

Eine Auszählung der monatlichen Häufigkeiten für die GWL geordnet nach Zirkulationsformen und Teilzeiträumen zeigt (Abb. 2), daß besonders in den Monaten Juni–September die Häufigkeiten zonaler Wetterlagen im Zeitraum 1967–1973 stark ab-, meridionale Wetterlagen erheblich zugenommen haben. Auch die Häufigkeit gemischter Typen zeigt eine generelle Häufigkeitsabnahme in diesen Monaten.

Diese bemerkenswerte Änderung in der Häufigkeit meridionaler und zonaler Wetterlagen im europäischen Quadranten ist verbunden mit einer Verlagerung des mittleren räumlichen Verteilungsmuster der Niederschläge in Europa und der übrigen Welt (Abb. 3, WINSTANLEY 1974; HEYER 1963) seit 1960. Gegen-

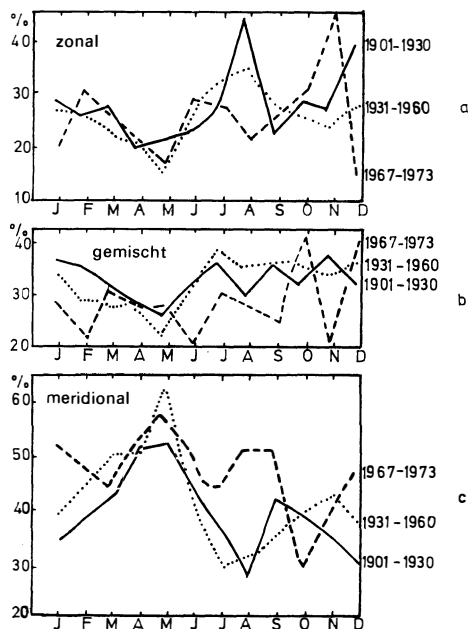


Abb. 2: Prozentuale jahreszeitliche Auftretshäufigkeit zonaler (a), gemischter (b) und meridionaler (c) Wetterlagen in Europa. 1901–1960 nach HESS und BREZOWSKY (1969), 1967–1973 eigene Auszählung „der Großwetterlagen Europas, Amtsblatt des Deutsch. Wetterdienstes, Jahrgang 20–26“

Percentage seasonal frequency of occurrence of zonal (a), mixed (b) and meridional (c) circulation types in Europe. 1901–1960 after HESS and BREZOWSKY (1969), 1967–1973 author's calculations of the "Major circulation types in Europe, Official Journal of the German Weather Service, Volumes 20–26"

über den mittleren Positionen der Höhenträge (500 mb), deren Trogvorderseiten im Mittel generell eine Niederschlagsbegünstigung ausweisen, scheinen sich die Zonen erhöhter Niederschlagsgunst in westliche Richtung verlagert zu haben (Abb. 3). Gleichzeitig haben die jährlichen Niederschlagssummen im Subtropenbereich zugenommen, in den Randtropen ab- und in der inneren Tropenzone zugenommen. In Verbindung mit der Häufigkeitszunahme meridionaler Wetterlagen im europäischen Sektor kann für diesen Bereich ein einfaches Erklärungsmodell versucht werden, welches allerdings nur in größter Näherung die Vielfältigkeit der atmosphärischen Prozesse beschreibt: Die zonale Zirkulationsform ist durch einen vornehmlich zonalen Verlauf der in langen Wellen geringer Amplitude mäandrierenden Höhenströmung (500 mb) westlicher Richtungskomponente sowie durch eine weitgehend zonale Anordnung der intensiv ausgebildeten Bodendruckgebilde im Mittel gekennzeichnet, wie in Abb. 4a stark vereinfacht für die Nordhemisphäre dargestellt ist. Beim Vorherrschen meridionaler Zirkulationsformen vergrößern sich die Amplituden und verkleinern sich die Wellenlängen. Diese Verkürzung der Wellenlängen führt zu einer Westverlagerung der Trogachsen. Die Bodendruckgebilde zeigen gleichzeitig eine geringe Intensität und sind in Nord-Südrichtung oft elongiert (Abb. 4b). Es bilden sich gehäuft blockierende Hochdruckgebiete aus, die die Zyklonen nur entlang ihrer Nord- bzw. Südflanke in West-Ostrichtung passieren lassen. Die westlich der mittleren Trogachsenposition auftretende Niederschlagszunahme könnte auf die Westverlagerung der Trogachsen, die Zunahme der Niederschlagssummen in den Subtropen und den subpolaren Breiten auf die Amplitudenvergrößerung der langen Wellen und die dadurch ausgelöste nord- bzw. südwardige Ausschering der Zyklonenbahnen zurückgeführt werden.

Die Amplitudenvergrößerung der langen Wellen (500 mb) führt zu einer äquatorwärtigen Abdrängung der tropischen Ostströmung und damit zugleich zu einer äquatorwärtigen Einengung des Migrationsbereiches der ITC, wie beispielhaft für den August 1972 in Abb. 5 gezeigt wird. Der bimodale breitenabhängige Kurvenverlauf des Höhengradienten der 500-mb-Fläche (Abb. 5 [2]) ist charakteristisch für meridionale Höhenströmungen, die beiden Geschwindigkeitsmaxima kennzeichnen näherungsweise die oben erwähnten nördlich und südlich der blockierenden Hochdruckgebiete verlaufenden Zyklonenzugbahnen, während die deutliche äquatorwärtige Abdrängung des Übergangs der außertropischen West- in die tropische Ostströmung in 20° Ost erheblich stärker ist als in 0° West und 20° West. Die meridionale Einengung des Migrationsbereiches der ITC muß theoretisch bei gleichem Wasserdampfangebot in den Tropen zu einer Zunahme des Niederschlags in den inneren Tropen führen, wie sie in Abb. 3 für die Zeit von 1960–1973 nach den effektiven Jahreswerten angegeben ist.

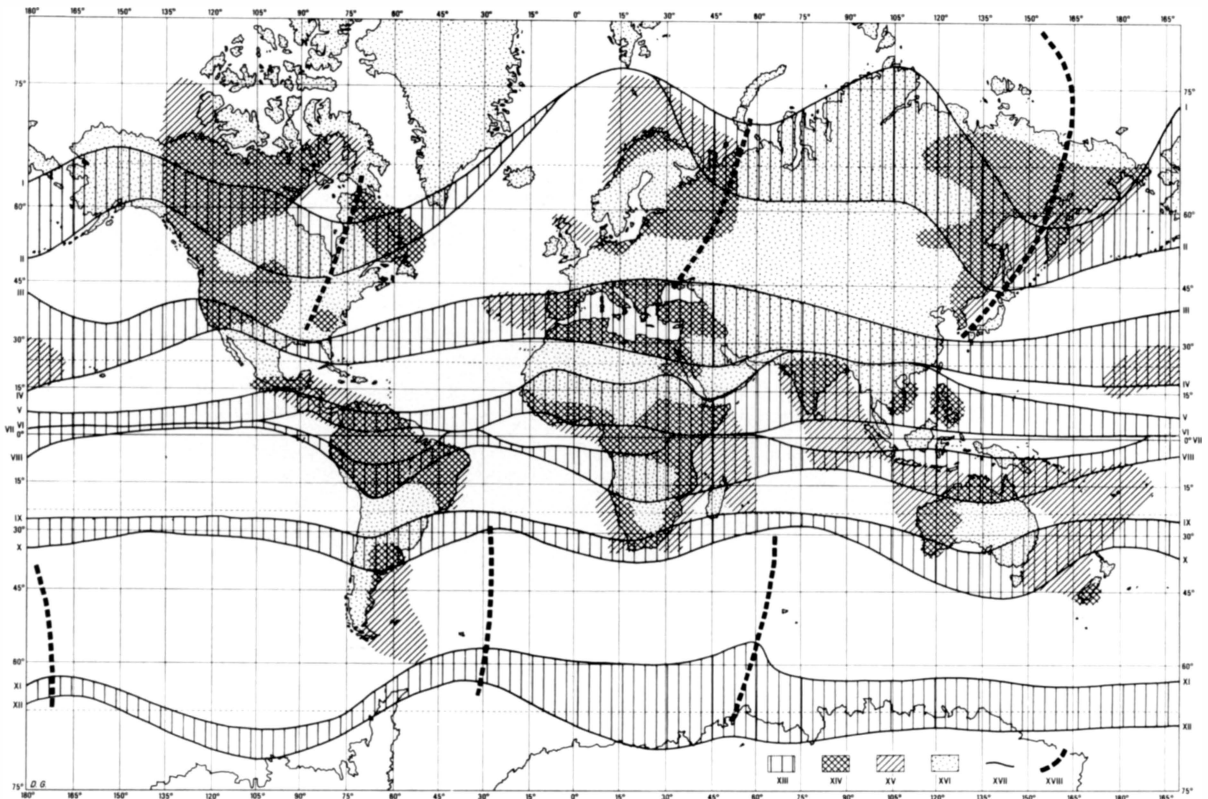


Abb. 3: Trend der weltweiten Niederschlagsverteilung seit 1960 in Abhängigkeit zu den Klimazonen (zusammengestellt nach: WINSTANLEY, 1974; HEYER, 1963)

I und XI Polargrenze der außertropischen Westwinde im Juli; II und XII Polargrenze der außertropischen Westwinde im Januar; III und IX Polargrenze der Passate im Juli; IV und X Polargrenze der Passate im Januar; V Nördliche ITC im Juli; VI Nördliche ITC im Januar; VII Südliche ITC im Juli; VIII Südliche ITC im Januar; XIII Jahreszeitlicher Migrationsbereich der Klimazonen; XIV Zunehmende jährliche Niederschlagssummen seit 1960 (Land); XV Zunehmende jährliche Niederschlagssummen seit 1960 (See); XVI Abnehmende jährliche Niederschlagssummen seit 1960 (Land); XVII Begrenzungslinien der genetischen Klimazonen; XVIII Langjährige mittlere Lage der Trogachsen (500 mb)

Trend of world wide precipitation distribution since 1960 in relation to climatic zones (assembled after: WINSTANLEY, 1974; HEYER, 1963)

I and XI polar boundary of the extratropical west wind in July; II and XII polar boundary of the extratropical westwind in January; III and IX polar boundary of the Passat in July; IV and X polar boundary of the Passat in January; V northern ITC in July; VI northern ITC in January; VII southern ITC in July; VIII southern ITC in January; XIII seasonal migration area of climatic zones; XIV increasing annual precipitation totals since 1960 (land); XV increasing annual precipitation totals since 1960 (sea); XVI decreasing annual precipitation totals since 1960 (land); XVII boundary lines of genetic climatic zones; XVIII long-term mean position of trough axes (500 mb)

#### Häufigkeit der Großwetterlagen und Niederschlagsverteilung in der Sabel-Sudanzone

Von der „Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer“ (ORSTOM) in Paris und der „Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et a Madagascar“ in Dakar wurden für 296 Stationen aus den Ländern Senegal, Mauretanien, Obervolta, Mali, Niger, Elfenbeinküste und Dahomey die monatlichen Niederschlagsdaten beschafft. Beim Deutschen Wetterdienst in Offenbach wurden die täglichen GWL für den Zeitraum von 1881–1973 auf Magnetband übernommen. Die Sonnenfleckenrelativ-

zahlen der Züricher Reihe sind dem Meteorologischen Taschenbuch bis zum Jahr 1960, für die Folgejahre dem Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes, Großwetterlagen Europas, entnommen. Einige wenige weitere Stationen wurden aus den „Weather Records“ bis 1960 und von 1960–1973 aus den „Monthly Climatic Data for the World“ zusammengestellt. Fehlende Monatswerte wurden durch die langjährigen Monatsmittelwerte ersetzt, fehlende Jahreswerte im Falle signifikanter Korrelationskoeffizienten zwischen den Zeitreihen von Nachbarstationen nach der Verhältnismethode ergänzt.

Zum Nachweis der Beziehung zwischen dem räum-

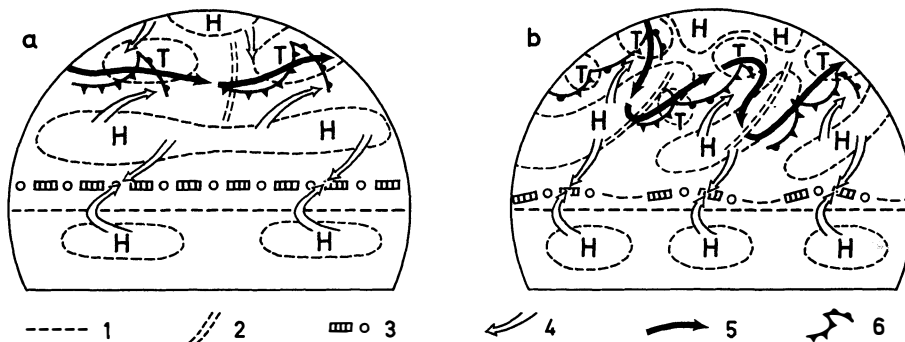


Abb. 4: Modell der allgemeinen Zirkulation beim Vorherrschen einer Zonalzirkulation (a) und einer Meridionalzirkulation (b). 1 Isobaren; 2 Troglinie (500 mb); 3 ITC; 4 Hauptwindrichtung im Bodenniveau; 5 Strömung im 500-mb-Niveau; 6 Bodenfronten

Model of general circulation when zonal circulation (a) is dominant and meridional circulation (b)

1 isobares; 2 trough line (500 mb); 3 ITC; 4 main wind direction at ground level; 5 streaming at the 500 mb level; 6 ground level fronts

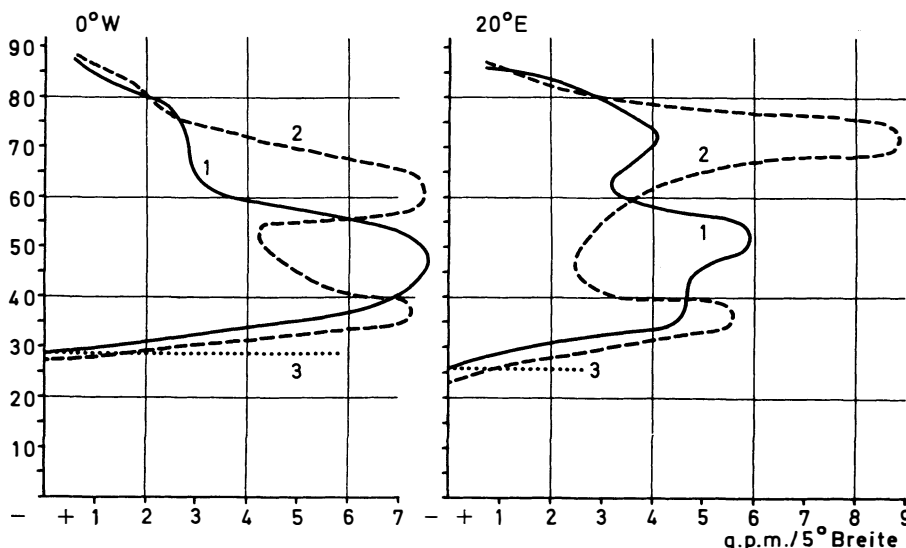


Abb. 5: Gradient bestimmt für die Höhe der 500-mb-Fläche pro 5° Breitendifferenz. Positiver Gradient: Westwind; Negativer Gradient: Ostwind. August 1972, 0° W und 20° W

1 Mittlerer Gradient (August 1949–1968); 2 Gradient (August 1972); 3 Übergang der außertropischen Westwinde in die tropischen Ostwinde (Mittel für August 1949–1968)

Gradient calculation for the height of the 500 mb surface per 5° difference in latitude. Positive gradient: west wind; negative gradient: east wind. August 1972, 0° W and and 20° W

1 mean gradient (August 1949–1968); 2 gradient (August 1972); 3 transition of the extratropical west winds into tropical east winds (mean for August 1949–1968)

lichen Verteilungsmuster der jährlichen Niederschlags-summen in Westafrika und der Häufigkeit bestimmter GWL über Europa wurde die mittlere prozentuale Abweichung der Jahressummen der Niederschläge, die in den Jahren mit überdurchschnittlicher Häufigkeit bestimmter GWL auftraten, vom langjährigen Mittelwert in Abb. 6a–8a für Westafrika dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit für die Abweichung der langjährigen von den wetterlagenabhängigen Mittelwerten (bzw. der Abweichungen zwischen den Standardab-

weichungen) wurde ebenfalls berechnet (Abb. 6b–8b, 6c–8c).

Das überdurchschnittlich häufige Auftreten meridionaler GWL ist nördlich von 15° N fast ausnahmslos mit unterdurchschnittlich hohen Jahressummen des Niederschlags verbunden. Andererseits ist der Guinea-küstenstreifen durch positive prozentuale Abweichungen vom Mittelwert gekennzeichnet. Das entspricht generell dem aufgezeigten Schema, auffällig bleibt jedoch ein SW-NE verlaufender Streifen, der von der

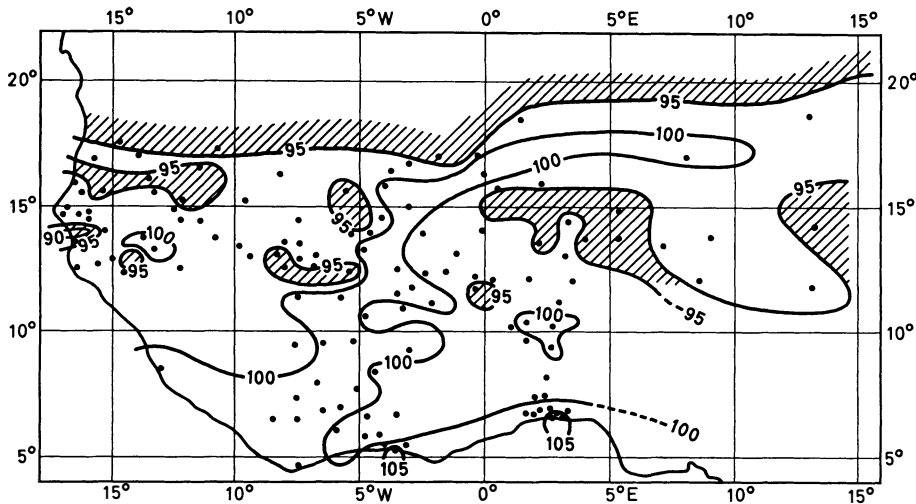


Abb. 6a: Prozentuale Abweichung des wetterlagenabhängigen Mittelwertes (meridionale Zirkulationsform) vom langjährigen Mittelwert der jährlichen Niederschlagssummen  
 Percentage deviation of the circulation-dependent mean value (meridional circulation form) from the long-period mean value of annual precipitation totals

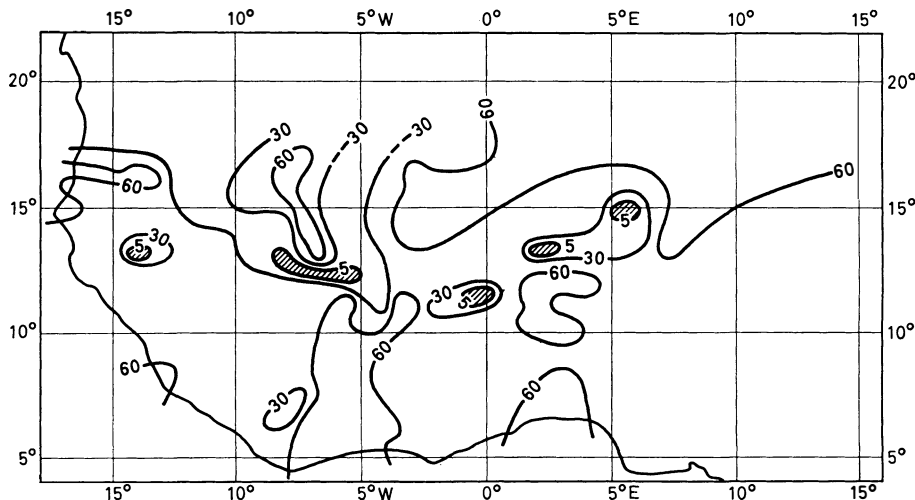


Abb. 6b: Irrtumswahrscheinlichkeiten in Prozent für das Auftreten der Differenzen zwischen wetterlagenabhängigen (meridionale Zirkulationsform) und langjährigen Mittelwerten der Niederschlagssummen. Schraffierte Bereiche: 5%ige Irrtumswahrscheinlichkeit wird unterschritten

Error probabilities in percent for the occurrence of differences between circulation-dependent (meridional circulation form) and long-period mean values of precipitation totals. Hatched areas: 5% level of error probability not exceeded

westlichen Guineaküste ausgehend bis Agadez reicht und durch überdurchschnittlich hohe Niederschlagswerte gekennzeichnet ist. Der Vergleich mit Abb. 6b zeigt allerdings, daß diese positiven Abweichungen vom langjährigen Mittel ausnahmslos zufallsbedingt sein können. Im Gegensatz dazu liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit der Niederschlagsdefizite der westlichen Sahelzone und der anschließenden Sudanzone unter 30%. Lediglich zwischen Bamako und Kondiala und im Bereich Tahoue, Tenkodogo und Tillabery sind

vier kleine Bereiche erkennbar, in welchen die Irrtumswahrscheinlichkeit 5% unterschreitet. Die Teilgebiete, in denen die wetterlagenabhängige Standardabweichung mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 30% von der langjährigen Standardabweichung abweicht, koinzidieren nicht mit den Räumen signifikanter Unterschiede zwischen den entsprechenden Mittelwerten.

Das Verteilungsmuster der positiven Abweichungen im Falle überdurchschnittlich hoher Häufigkeiten zo-

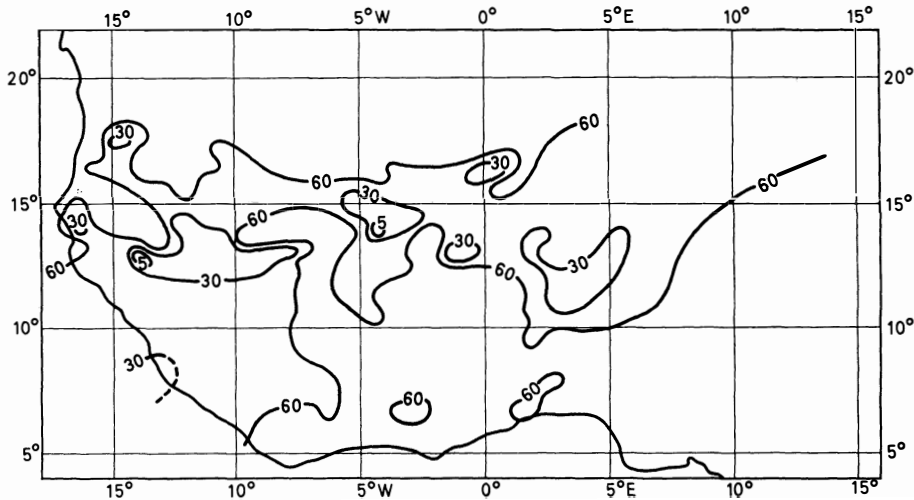


Abb. 6c: Irrtumswahrscheinlichkeiten in Prozent für das Auftreten der Differenzen zwischen wetterlagenabhängigen (meridionale Zirkulationsform) und langjährigen Standardabweichungen  
 Error probabilities in percent for the occurrence of differences between circulation-dependent (meridional circulation form) and long-period standard deviations

Tabelle 1: Räumliche Verbreitung positiver und negativer prozentualer Abweichungen der jährlichen Niederschlagssummen vom Mittel in Westafrika beim Vorherrschen bestimmter Großwetterlagen über Europa (Spaltennumerierung s. Text)

Spatial distribution of positive and negative percentage deviations of annual precipitation totals from the mean in West Africa when particular circulation types are dominant over Europe (details see text)

GWL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
WA	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	±		±	-	-	-		
WZ	-	-	+	+	-	-	-	±	±	+	+	+	+	-		-	-	-	-		
WS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		
WW	±	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-		
SW	±	-	±	±	-	-	+	-	-	±	±	±	-	±		+	+	+	+		
TM	-	+	+	+	+	+	+	+	±	±	+	+	+	+		±	-	-	-		
HM	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		±	-	±	-		
BM	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		
NW	+	+	±	±	±	-	-	+	+	+	+	+	+	+		+	-	-	±		
HFZ	±	-	+	±	±	+	-	+	-	±	±	+	-	±		+	-	-	±		
TRM	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-		-	+	+	+		
TRW	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+		+	+	+	+		

naler Wetterlagen (Abb. 7a) entspricht nicht dem oben angegebenen Modell. Zwar ist zwischen 10° West und 15° Ost im Sahelstreifen eine z. T. erhebliche Zunahme der Niederschläge gegenüber den langjährigen Mittelwerten erkennbar, gleichzeitig bleiben die wetterlagenabhängigen Mittelwerte westlich von 10° West aber unter den langjährigen Mittelwerten. Entsprechend dem Modell sind in der inneren Tropenzone die wetterlagenabhängigen Niederschlagssummen geringer als die langjährigen Mittel. Mit einer geringeren als 30%igen Irrtumswahrscheinlichkeit sind die Niederschlagsdefizite im Bereich der mauretanischen Küstenregion sowie in Dahomey und der Elfenbeinküste signifikant. Dabei unterscheidet sich besonders an der Elfenbeinküste die wetterlagenabhängige Standard-

abweichung von der langjährigen Standardabweichung mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von erheblich weniger als 30%.

Da sowohl meridionale als auch zonale GWL in weiten Gebieten Westafrikas Defizite des Niederschlags zu verursachen scheinen, bleibt die Frage, welche Wetterlagen signifikant zu Niederschlagsüberschüssen führen. Abb. 8 zeigt, daß Wetterlagen vom gemischten Zirkulationstyp erhebliche Niederschlagsüberschüsse im Sahelraum bewirken. In einem breiten Zonalstreifen liegen die Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Wahrscheinlichkeit signifikanter Differenzen zwischen langjährigen und wetterlagenabhängigen Mittelwerten erheblich unter 30%, punktuell sogar unter 5%, an 21% aller Stationen dieses Gebietes sogar unter 1%.

Nur an einigen wenigen Stationen fallen im 30%/0-Niveau signifikante Mittelwerte und Standardabweichungen zusammen.

In Tabelle 1 sind ohne Berücksichtigung der Irrtumswahrscheinlichkeiten die positiven bzw. negativen Abweichungen der wetterlagenabhängigen Mittelwerte von den langjährigen Mittelwerten angegeben. Die Nummern in der ersten Tabellenzeile stehen für die Koordinatenquadrate, die von links nach rechts und dann jeweils von oben nach unten durchnummeriert

wurden. 1 steht für den Quadranten ausgehend vom Kartenrand bis 15° W und 20–15° N, 2 für 15–10° W und 20–15° N etc. Plus steht für überwiegend positive Abweichungen, minus für überwiegend negative. Plus/minus deutet ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen positiven und negativen Abweichungen an. Es wird deutlich, daß die zonalen WW Wetterlagen den größten Anteil negativer Abweichungen bei den zonalen Zirkulationsstrukturen erbringen, während die HFZ-Lagen für einen Teil der positiven Abweichun-

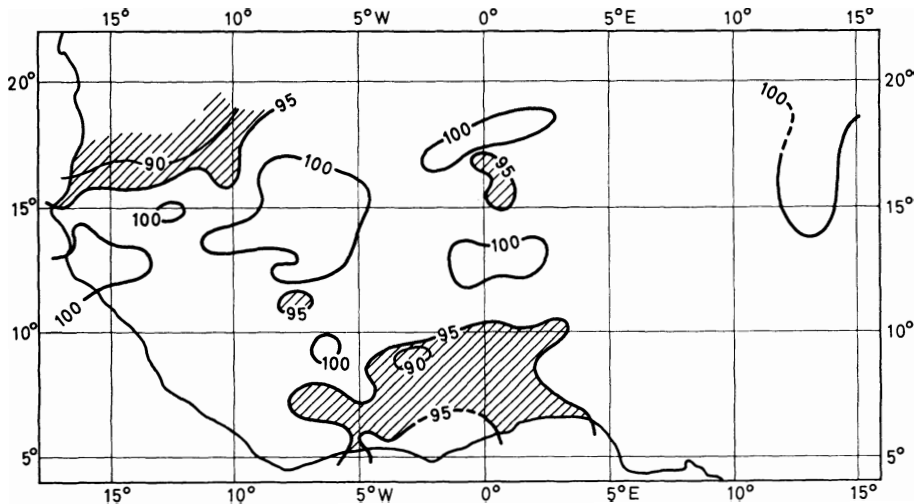


Abb. 7a: Prozentuale Abweichung des wetterlagenabhängigen Mittelwertes (zonale Zirkulationsform) vom langjährigen Mittelwert der jährlichen Niederschlagssummen

Percentage deviation of the circulation-dependent mean value (zonal circulation form) from the long-period mean of annual precipitation totals

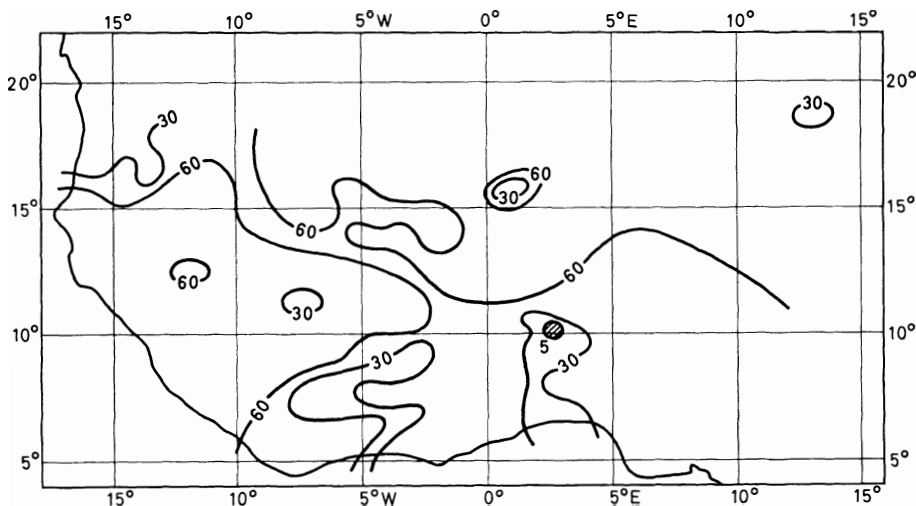


Abb. 7b: Irrtumswahrscheinlichkeiten in Prozent für das Auftreten der Differenzen zwischen wetterlagenabhängigen (zonale Zirkulationform) und langjährigen Mittelwerten der Niederschlagssummen. Schraffierte Bereiche: 5%ige Irrtumswahrscheinlichkeit wird unterschritten

Error probabilities in percent for the occurrence of differences between circulation-dependent (zonal circulation form) and long-period mean values of precipitation totals. Hatched areas: 5% level of error probability not exceeded

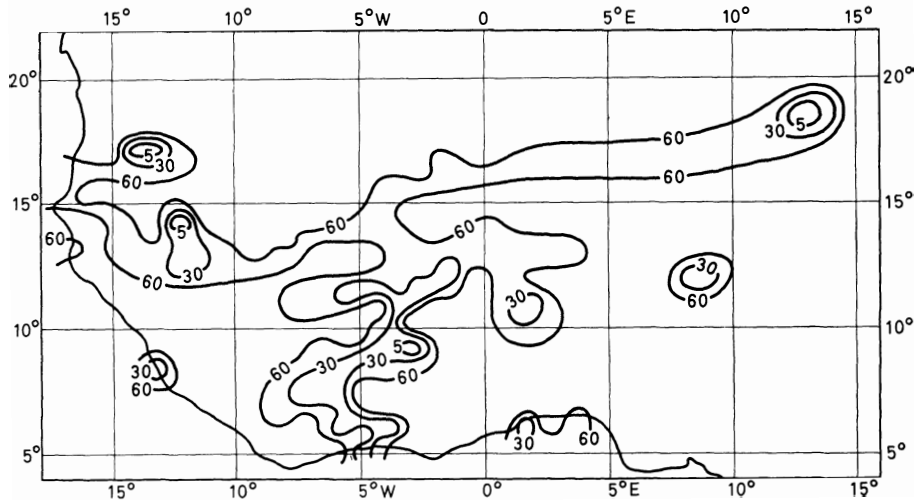


Abb. 7c: Irrtumswahrscheinlichkeiten in Prozent für das Auftreten der Differenzen zwischen wetterlagenabhängigen (zonale Zirkulationsform) und langjährigen Standardabweichungen  
Error probabilities in percent for the occurrence of differences between circulation-dependent (zonal circulation form) and long-period standard deviations

gen im Fall meridionaler Zirkulationsformen verantwortlich sind. Unter Berücksichtigung der gemischten Zirkulationsform wird der Schluß nahegelegt, daß weniger die GWL als vielmehr die mit den GWL verbundenen Trogpositionen für das räumliche Verteilungsmuster der Niederschläge in Westafrika verantwortlich sein könnten. Eine Typisierung der GWL nach diesen Gesichtspunkten und eine entsprechende Analyse der Niederschlagsverhältnisse in Westafrika wird versucht.

#### Perioden der analysierten Zeitreihen

##### a) Die Verteilungsstruktur der Jahresniederschlagssummen

Zur Bestimmung signifikanter Periodizitäten in Zeitreihen kann die Spektrumanalyse angewandt werden. Im strengen Sinne ist Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode (TAUBENHEIM 1969, p. 224), daß ein Gaußscher Zufallsprozeß in einer homogenen Zeitreihe vorliegt. Das bedeutet aber, daß der Erwartungswert von der Zeit unabhängig ist und die Verteilungsfunktion einer Normalverteilung entspricht. Nach MITCHELL (1966, p. 33f.) ist eine quasnormalverteilte Struktur der Daten hinreichend für die Anwendung der Spektrumanalyse. Fehlende Stationarität ist bei Niederschlagszeitreihen immer gegeben und bedeutet, das die Ergebnisse im strengen Sinne nur für den analysierten Beobachtungszeitraum aussagekräftig sind.

Die normalverteilte Struktur der vorliegenden Zeitreihen wurde durch den Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der jährlichen Niederschlagssummen mit der aus Mittelwert und Standardabweichung dieser Ver-

teilungen berechneten Normalverteilung (Chi-Quadratstest) belegt. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für einige Stationen zusammengestellt. Im Falle eines signifikanten Abweichens der Häufigkeitsverteilung von der Normalverteilung wurde eine Transformation der Daten mit

$$x_i^* = \sqrt{x_i} + \sqrt{x_i + 1}$$

durchgeführt. Querstrich mit nachgestellter Null bedeutet in Tabelle 2, daß die Transformation zu einer normalverteilten Struktur führte. Im Falle starker Erhaltungseigenschaft (einfache Markov-Persistenz) erbrachte die Transformation in keinem Fall den gewünschten Erfolg. Für diese nichtnormalverteilten Zeitreihen sind insbesondere die Ergebnisse der Autokorrelationsanalyse nicht zu interpretieren, auch wenn die Korrelationskoeffizienten signifikant sind.

Die Häufigkeitsverteilungen der jährlichen Niederschlagssummen die in diesem Zusammenhang gebildet wurden, geben Anlaß zu folgender Gliederung:

1. Verteilung ist unimodal und symmetrisch oder der Modus liegt links bzw. rechts des Medians (wird isf. als links- bzw. rechtsmodal bezeichnet);
2. Verteilung ist bimodal und symmetrisch oder linksmodal oder rechtsmodal;
3. Verteilung ist multimodal und symmetrisch oder linksmodal oder rechtsmodal.

Die multimodalen Verteilungen sind ausschließlich durch drei Modi charakterisiert (Abb. 9a-d). In Tab. 3a sind die Verteilungstypen in Abhängigkeit zur geographischen Breite und Länge zusammengestellt. Der Verteilungstyp mit drei Modi ist charakteristisch für den äquatornahen Bereich westlich des Nullmeri-



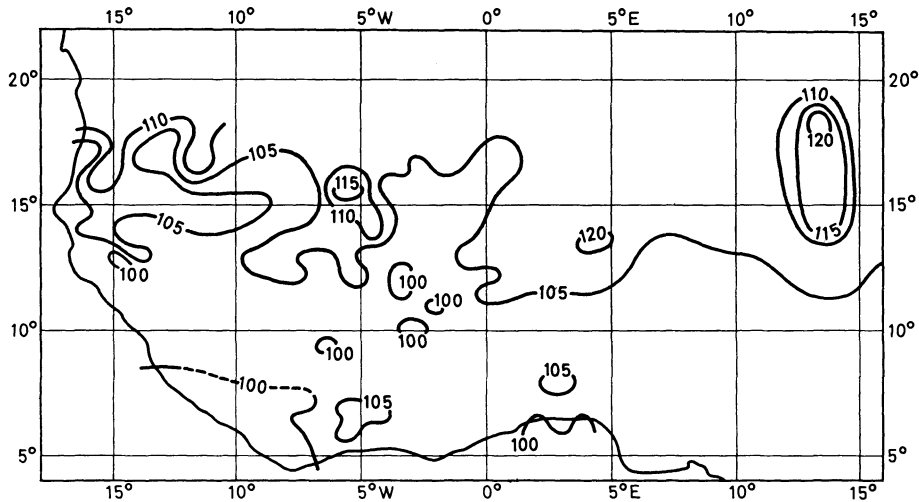


Abb. 8a: Prozentuale Abweichung des wetterlagenabhängigen Mittelwertes (gemischte Zirkulationsform) vom langjährigen Mittelwert der jährlichen Niederschlagssummen  
 Percentage deviation of the circulation-dependent mean value (mixed circulation form) from the long-period mean value of annual precipitation totals

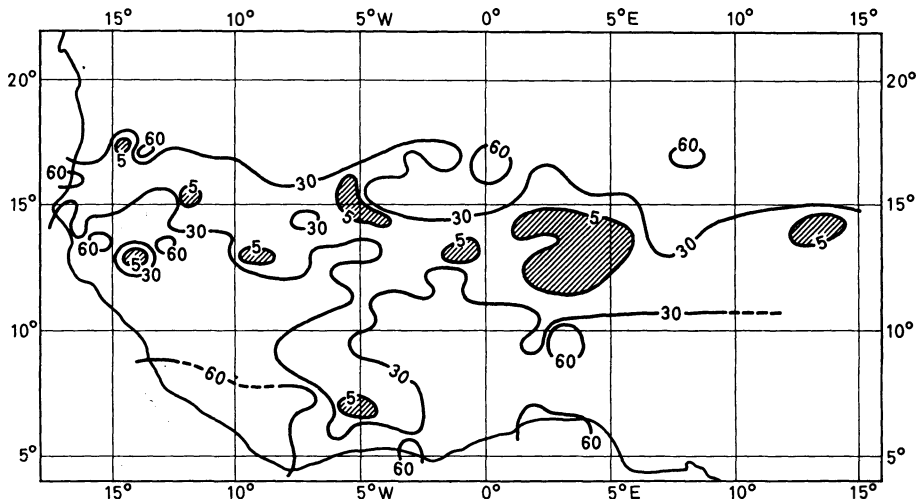


Abb. 8b: Irrtumswahrscheinlichkeiten in Prozent für das Auftreten der Differenzen zwischen wetterlagenabhängigen (gemischte Zirkulationsform) und langjährigen Mittelwerten der Niederschlagssummen. Schraffierte Bereiche: 5%ige Irrtumswahrscheinlichkeit wird unterschritten  
 Error probabilities in percent for the occurrence of differences between circulation-dependent (mixed circulation form) and long-period mean values of precipitation totals. Hatched areas: 5%ige level of error probability not exceeded

dians, östlich davon bleibt dieser Typ bedeutsam, die linksmodalen Verteilungen mit nur einem Modus gewinnen hier aber an Bedeutung. Unimodale linksmodale und auch unimodale symmetrische Verteilungen erreichen maximale Häufigkeit im Breitenkreisstreifen 11–15° N und westlich des Nullmeridians, östlich dieser Länge ist neben den genannten auch noch der bimodale Verteilungstyp mit schwacher Bevorzugung der Klassen geringer Niederschlagshöhen auffällig. Zwischen 16–20° N herrschen eindeutig linksmodale Ver-

teilungen westlich des Nullmeridians vor, während rechtsmodale Verteilungen in 21% aller Fälle zu beobachten sind. Östlich des Nullmeridians ist das Verhältnis rechts- und linksmodaler Verteilungen fast ausgeglichen.

Linksmodal deutet das gehäufte Auftreten unterdurchschnittlich geringer jährlicher Niederschlagssummen an, rechtsmodal das Gegenteil. Drei Modi mit einem Zentralmodus im Bereich des Medians dokumentieren den Wechsel zwischen Jahren mit überdurch-

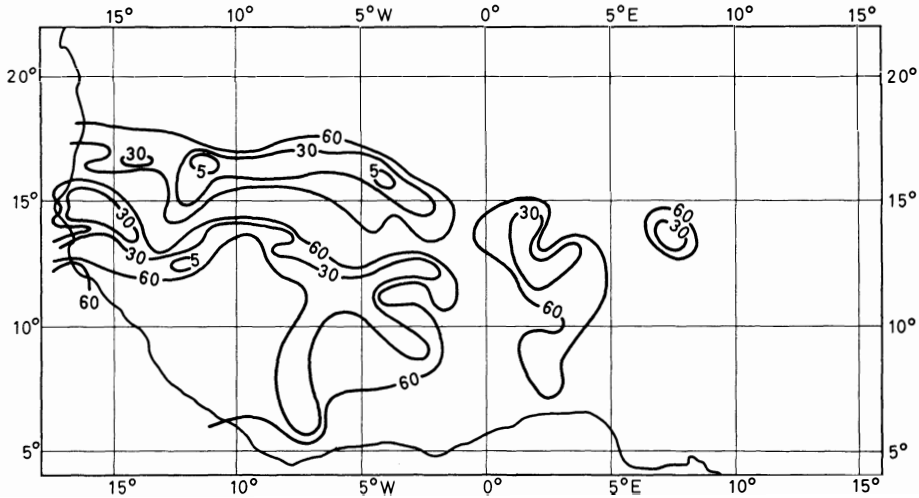


Abb. 8c: Irrtumswahrscheinlichkeiten in Prozent für das Auftreten der Differenzen zwischen wetterlagenabhängigen (gemischte Zirkulationsform) und längsjährigen Standardabweichungen  
 Error probabilities in percent for the occurrence of differences between circulation-dependent (mixed circulation form) and long-period standard deviations

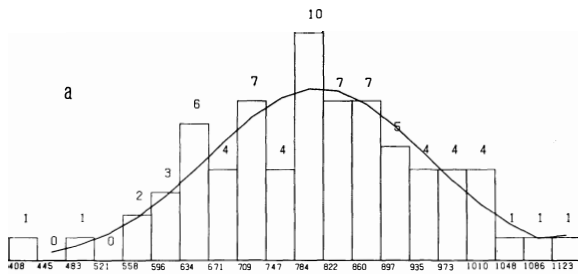
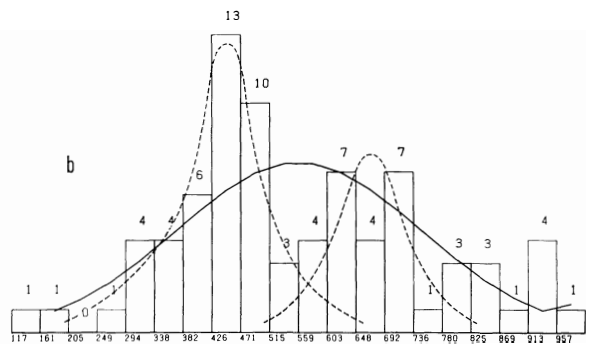
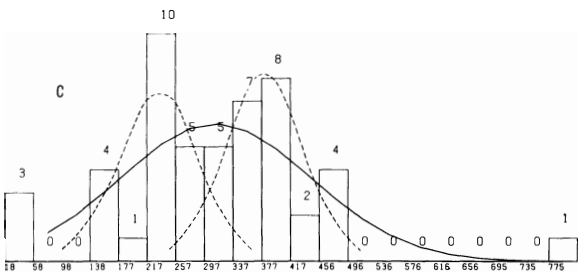


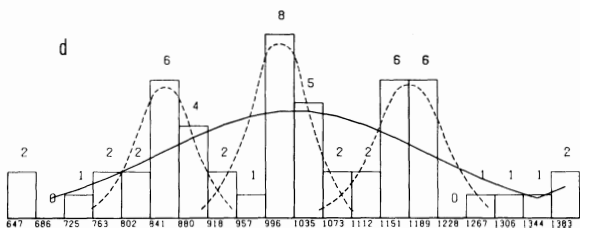
Abb. 9: Charakteristische Häufigkeitsverteilungen der jährlichen Niederschlagssummen  
 Characteristic frequency of distributions of annual precipitation totals  
 a) Ougadougou, 12.22 N 1.31 W (unimodal, symmetrisch)



b) Dakar Ho., 14.40 N 17.26 W (bimodal, linksmodal)



c) Ansongo, 15.40 N 0.30 E (bimodal, schwach rechtsmodal)



d) Leo, 11.06 N 2.06 W (multimodal mit drei Modi)

schnittlich hohen, überdurchschnittlich geringen und durchschnittlich hohen Niederschlagsmengen.

Die Höhe der jährlichen Niederschlagssummen im angesprochenen Bereich wird entscheidend durch die Intensität des SW-Monsuns und damit durch den

Migrationsbereich der ITC bestimmt. Defizitäre Jahre entstehen im Zonalring 16–20° N bei schwachem Monsun und einer äquatornahen Lage der ITC, niederschlagsreiche Jahre sind hingegen mit einer extremen Nordwanderung und anhaltenden Nordposition der

Tabelle 2: Verteilungsstruktur der Häufigkeiten jährlicher Niederschlagssummen in Westafrika (1918/23–1972/3)  
 Distributional structure of the frequency of annual precipitation totals in West Africa (1918/23–1972/3)

Station			Jahre	Norm. Vert.	20%	10%	5%	1%	uni. Mod.	bim. Mod.	mult. Mod.
Abengour	6.43 N	3.30 W	54	+							3
Abiosso	5.28 N	3.12 W	52	+							3
Abomey	7.11 N	1.59 W	53	+					L		
Adjohon	6.42 N	2.29 E	53				+		L		
Agadez	11.58 N	7.59 E	53					+	L		
Agbovill	5.55 N	4.13 W	51	+						L	
Aleg	17.03 N	13.55 W	53					+	L		
Allada	6.39 N	2.08 W	52			+					3(R)
Ansongo	15.40 N	0.30 E	51					+		R	
Athieme	6.34 N	1.40 E	53				+		L		
Bakel	14.54 N	12.28 W	56					+	L		
Bamako	12.38 N	8.02 W	55			+					3
Bambey	14.42 N	16.28 W	53				+/0				3(L)
Bandiaga	14.20 N	3.36 W	54					+		L	
Banfora	10.38 N	4.46 W	52					+			3
Bemberek	10.12 N	2.40 E	53	+							3
Bilma	18.41 N	12.55 E	52					+	S		
Bobo Diol.	11.10 N	4.18 W	67	+					S		
Boghe	16.35 N	14.17 W	55					+	S		
Bopa	6.34 N	1.58 E	53					+	S		
Boromo	11.45 N	2.55 W	52					+	L		
Bonake	7.44 N	5.04 W	66					+	S		
Bougouni	11.25 N	7.30 W	53	+							3
Bonkombe	10.10 N	1.06 E	51	+							3
Bouna	9.16 N	2.59 W	54		+						3(L)
Boundial	9.31 N	6.28 W	52	+							3(L)
Boutilim	17.32 N	14.14 W	53	+							3
Cotonou	6.21 N	2.26 E	52				+		L		
Dabakala	8.23 N	4.26 W	52			+/0					3(L)
Dagana	16.31 N	15.30 W	56					+	L		
Dakar Ho.	14.40 N	17.26 W	78				+			L	
Daloa	6.53 N	6.27 W	55	+							3(L)
Dedougou	12.28 N	3.28 W	52					+	L		
Dialakot	13.19 N	13.18 W	29	+					L		
Diebougou	10.58 N	3.15 W	52					+		L	
Dimbokro	6.39 N	4.42 W	52					+	L		
Diourbel	14.39 N	16.14 W	55	+						L	
Djenne	13.54 N	4.34 W	52					+/0	L		
Djoujon	9.42 N	1.40 E	53	+					S		
Dogoudou	13.38 N	4.00 E	51	+						L	
Dori	14.02 N	0.02 E	54	+					L		
Fada n. G.	12.04 N	0.21 E	54	+						L	
Fatick	14.20 N	16.24 W	56	+							3
Foundiou	14.07 N	16.28 W	56	+					S		
Freetown	8.29 N	13.09 W	99	+							3(L)
Gagnoa	6.08 N	5.57 W	51	+							3(L)
Gao	16.16 N	0.03 W	53					+	L		
Gaoua	10.20 N	3.11 W	53					+	S		
Goundam	16.25 N	3.40 W	54					+	S		
Grand La.	5.08 N	5.00 W	53	+							3
Grand Po.	6.17 N	1.49 E	53					+	L		
Hounde	11.29 N	3.31 W	52					+		L	
Kabara	16.42 N	2.59 W	51	+					S		
Kaedi	16.08 N	13.31 W	51					+	L		
Kandi	11.08 N	2.56 E	53	+							3
Kano	12.03 N	8.32 E	69					+	S		
Kaolack	14.02 N	16.04 W	56	+							3
Kaya	13.06 N	1.05 W	54		+/0						3

Tabelle 2: (Fortsetzung)

Station			Jahre	Norm. Vert.	20%	10%	5%	1%	uni. Mod.	bim. Mod.	mult. Mod.
Kayes	14.26 N	11.26 W	78		+/0				L		
Kedougou	12.34 N	12.13 W	56					+	S		
Khartoum	15.37 N	32.33 E	75					+		L	
Kidal	18.26 N	1.21 E	51					+		L	
Kidira	14.28 N	12.13 W	56					+	L		
Kiffa	16.38 N	11.24 W	52	+					R		
Kolda	12.53 N	14.58 W	52					+			3
Koudougou	12.15 N	2.22 W	53	+					R		
Koupela	12.11 N	0.21 W	51		+/0				L		
Koutiala	12.24 N	5.28 W	52	+					L		
Lagos	6.26 N	3.24 E	82	+							3
Leo	11.06 N	2.06 W	54	+							3(R)
Louga	15.37 N	16.18 W	56				+/0			R	
Maiduguri	13.05 N	13.05 E	58					+		L	
Maka Cou.	13.40 N	14.18 W	53	+					S		
Man. Aer.	7.23 N	7.31 W	51					+		R	
Matam	15.38 N	13.15 W	56					+/0		L	
M-Bao Th.	14.46 N	17.29 W	55		+						3(L)
M. Beulac	15.35 N	15.21 W	56		+/0						3(L)
Menaka	15.52 N	2.13 E	51					+/0		R	
Mopti	14.31 N	4.06 W	53					+	L		
Natiting	10.19 N	1.23 E	53					+	S		
N'Guigmi	14.15 N	13.07 E	53	+					L		
Niafunke	15.56 N	3.59 W	54			+			L		
Niamey V.	13.30 N	2.08 E	69	+					S		
Nienebal	12.55 N	7.30 W	51		+/0					L	
Nikki	9.56 N	3.12 E	53	+							3(R)
Odienne	9.28 N	7.34 W	53					+	R		
Ougadougou	12.22 N	1.31 W	72	+					S		
Ouahigou	13.55 N	2.26 W	54	+					S		
Ouidah	6.22 N	2.05 E	53					+		L	
Parakou	9.21 N	2.37 E	53	+						L	
Pobe	6.56 N	2.40 E	53	+					L		
Podor	16.38 N	14.56 W	56					+		L	
Porto No.	6.29 N	2.37 E	51					+		L	
Rufisque	14.44 N	17.18 W	55	+							3(L)
Sakete	6.43 N	2.40 E	53					+	R		
San	13.17 N	4.54 W	52	+					L		
Sassandra	4.57 N	6.05 W	52	+							3(R)
Save	7.59 N	2.26 E	53					+			3(L)
Say	13.06 N	2.21 E	53	+							3(R)
Sedhiou	12.42 N	15.33 W	69				+/0				3(R)
Seguela	7.57 N	6.40 W	52	+							3(R)
Sikasso	11.21 N	5.41 W	54					+	S		
Tahoua	14.54 N	5.17 E	52					+		L	
Tambacond.	13.46 N	13.41 W	52					+/0		S	
Tenkodog	11.46 N	0.23 W	52			+			S		
Thies	14.48 N	16.57 W	56	+							3(L)
Tiassale	5.53 N	4.49 W	52				+				3(L)
Tillaber	14.12 N	1.27 E	51					+	L		
Saint Louis	6.01 N	16.30 W	120					+	L		
Tivahuan	14.57 N	16.49 W	56				+/0		S		
Yang Yang	15.39 N	15.21 W	56	+							3
Zinder	13.48 N	8.59 E	69	+					L		

L: Linksmodal      3: Es liegen 3 Modi vor  
R: Rechtsmodal    +: Kennzeichnung der Verteilungsstruktur  
S: Symmetrisch

ITC verbunden. Gewissermaßen spiegeln die bimodalen Verteilungen das zeitliche Wechselspiel von Jahren mit gut ausgebildetem SW-Monsun und Jahren mit stark entwickeltem NO-Passat wider. Entsprechend können linksmodale Verteilungen als Resultat des Vorherrschens von Jahren mit starkem NO-Passat (Harmattanregime), rechtsmodale als Ergebnis gehäufte Jahre mit intensiven Monsunvorstößen interpretiert werden.

Anders liegen die Verhältnisse im Breitenkreisring 5–10° N. Starke monsunale Vorstöße sind hier in der Regel mit einer Nordausdehnung der südhemisphärischen Höhenantizyklone verbunden (THOMPSON 1965), durch die das Phänomen der kleinen Trockenzeit verstärkt und die Summe der jährlichen Niederschläge reduziert wird. Tab. 3 zeigt, daß westlich und östlich des hier willkürlich als Trennungslinie herausgegriffenen Nullmeridians veränderte Verhältnisse vorliegen. Westlich treten gehäuft linksmodale Verteilungen in den Randtropen (16–20° N) und rechtsmodale Verteilungen in den inneren Tropen (5–10° N) auf, östlich hingegen rechtsmodale in den Randtropen und linksmodale in den inneren Tropen. Das spricht für eine Sonderstellung der senegalesisch-mauretanischen Küstenzone, in der die überwältigende Mehrzahl der

westlich des Nullmeridians liegenden Stationen zu lokalisieren ist.

Eine Analyse der räumlichen Verbreitung normalverteilter Zeitreihen zeigt einen weiteren Unterschied zwischen den Gebieten westlich und östlich des Nullmeridians. Während in der westlichen Zone (Abb. 10) zwischen 11–15° N 12 Zeitreihen (33% aller Stationen) mit Irrtumswahrscheinlichkeiten von 5–20% von der Normalverteilung abweichen, gibt es in der östlichen keine Verteilung, die diesen Kriterien entspricht. Hier gibt es nur Zeitreihen mit normalverteilter oder nicht normalverteilter Struktur.

Starke Erhaltungsneigung schließt die stochastische Unabhängigkeit der Veränderlichen einer Zeitreihe voneinander aus. Eine Zeitreihe wird als persistent (einfache Markov-Persistenz) angesehen, wenn der Autokorrelationskoeffizient der Zeitreihe bei einer Zeitverschiebung von einer Zeiteinheit (Jahr) signifikant von Null abweicht und  $r_2 \cong r^2_1$  sowie  $r_3 \cong r^3_1$  (MITCHELL 1966, p. 36) ist. 72% der untersuchten Stationen weisen keine so definierte Persistenz auf (Tab. 3b). Westlich des Nullmeridians treten nichtpersistente Zeitreihen in 11–15° N, östlich in 5–10° N bevorzugt auf. Andererseits ist der Bereich 11–15° N zugleich östlich und westlich des Nullmeridians durch

Tabelle 3a: Typen der Häufigkeitsverteilungen des jährlichen Niederschlags für Westafrika in Abhängigkeit zur geographischen Breite und Länge (%)

Types of frequency distribution of annual precipitation for West Africa related to geographical latitude and longitude (in percent) (unimodal; left-modal; bimodal; multimodal; right-modal)

		unimod. linksm.	bimod. linksm.	multim. linksm.	unimod. rechtsm.	bimod. rechtsm.	multim. rechtsm.	unimod.	bimod.	multim.
westliche Länge	5–10° N	12	12	28	4	4	12	12	0	16
	11–15° N	23	15	15	2.5	0	2.5	27.5	2.5	12.5
	16–20° N	27	13	7	7	7	7	13	7	10
östliche Länge	5–10° N	43	15	0	7	0	7	13	7	10
	11–15° N	30	30	8	0	0	8	15	0	8
	16–20° N	20	20	0	0	40	0	20	0	0

Tabelle 3b: Prozentuale Häufigkeit persistenter Zeitreihen in Abhängigkeit zur geographischen Breite und Länge (0.: keine Persistenz; 1.: Persistenz)

Percentage frequency of persistent time-series in relation to latitude and longitude (0 = no persistence; 1 = persistence)

		0.	1.	davon in		
				5° W–5° E	6–10° W	11–16° W
westliche Länge	5–10° N	16	6	13	7	0
	11–15° N	53	13	7	13	13
	16–20° N	9	3	0	0	7
östliche Länge	5–10° N	42	14	7	0	0
	11–15° N	18	26	26	7	0
	16–20° N	0	0	0	0	0

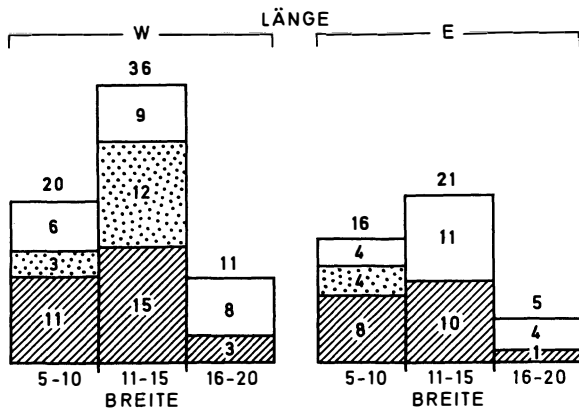


Abb. 10: Absolute Häufigkeit des Auftretens normalverteilter Strukturen der jährlichen Niederschlagssummen für Teile Westafrikas in Abhängigkeit von der geographischen Breite und Länge (schraffiert: normalverteilt; gepunktet: Abweichung von normalverteilter Struktur mit Irrtumswahrscheinlichkeiten zwischen 5–20%; ohne Signatur: Abweichung von normalverteilter Struktur mit Irrtumswahrscheinlichkeiten von 1%)

Absolute frequency of occurrence of normally distributed structures of annual precipitation totals for parts of West Africa, in relation to geographical latitude and longitude (hatched: normally distributed; dotted: deviation from normally distributed structure with error probabilities between 5% and 20%; without symbol: deviation from normally distributed structure with error probability of 1%)

in maximaler Häufigkeit auftretende Persistenz ausgezeichnet. Das ist klimatologisch zu erwarten, da in dieser Zone weder die äquatorwärtige ITC-Abdrängung noch die Nordvorstöße der südhemisphärischen Höhenantizyklone in voller Stärke wirksam werden. Eine Auszählung des Auftretens persistenter Zeitreihen in Abhängigkeit zur geographischen Länge zeigt, daß im Meridionalstreifen 5° W–5° E 53% aller im gesamten Gebiet auftretenden persistenten Zeitreihen lokalisiert sind. Im langjährigen Mittel schiebt sich ein Rücken von der südhemisphärischen Höhenantizyklone ausgehend bis in diese Zone vor. Für einen Zusammenhang mit dieser Höhenantizyklone spricht u. a. die Tatsache, daß außerhalb des von diesem Höhenrückens überlagerten Raumes nur an der westafrikanischen Atlantikküste einige wenige Stationen Persistenz ausweisen. In dieser Zone nimmt das nordhemisphärische subtropische Höhenhoch Einfluß. Anhaltende Anomalien sind demnach insbesondere für das Sahelgebiet mit Ausnahme der atlantischen Küstenzone der Ausnahmefall. Die beschriebene Linksmodalität der Verteilungen in diesem Gebiet ergibt sich durch ein Alternieren defizitärer und übernormaler Niederschlagsjahre. Dabei werden in bezug auf den Mittelwert mehrere defizitäre Jahre durch ein übernormales Niederschlagsjahr kompensiert.

## b) Anwendung der Spektralanalyse

Die komplizierte mathematische Herleitung der Spektralanalyse soll hier nicht wiederholt werden, da sie in allen statistischen Handbüchern (z. B. TAUBENHEIM 1969, p. 224) zur Darstellung kommt. Grundgedanke der Spektralanalyse ist die Annahme, daß sich Zeitreihen aus einer unendlichen Anzahl von Schwingungen zusammensetzen. Mit der Spektralanalyse wird bestimmt, wieviel der Gesamtvarianz einer Zeitreihe durch diese Schwingungen zu erklären ist. Die Summation des für die einzelnen Schwingungen bestimmten Varianzanteils ergibt die Gesamtvarianz. Wird diese gleich 1 (100) gesetzt, so läßt sich der prozentuale Anteil an der Gesamtvarianz, der für die verschiedenen berücksichtigten Schwingungen (Harmonischen) bestimmt wurde, bei einer Darstellung in Diagrammform unmittelbar ablesen. Liefern alle Harmonische etwa den gleichen Anteil an der Gesamtvarianz (Abb. 11a), wie im Falle einer Zeitreihe ohne jegliche Periodizität, so spricht man in Anlehnung an die Optik (weiß) und Funktechnik (Rauschen) von „weißem Rauschen“ (white noise). Liegt eine Periodizität – etwa Tages- oder Jahresgang – vor, so wird die entsprechende Harmonische erheblich mehr der Gesamtvarianz erklären als die übrigen Harmonischen. In Diagrammform drückt sich dies in einer singulären Spitze aus, während eine Quasiperiodizität einen hohen Varianzanteil bei mehreren aufeinanderfolgenden Harmonischen auslöst. Das drückt sich im Diagramm durch einen über mehrere Harmonische reichenden „Buckel“ aus.

Die statistische Signifikanz einer Periodizität wird durch den Vergleich des Varianzspektrums einer vorgegebenen Zeitreihe mit einem zufallsbedingtem weißen Rauschen geleistet (Test mit Chi-Quadrat,  $\nu =$  Zahl der Freiheitsgrade mit  $\nu = (2n-m)/2n$ ,  $n =$  Länge der Zeitreihe,  $m =$  Zahl der Harmonischen). Dabei ist der möglichen Mehrdeutigkeit der Frequenzen, die dem stroboskopischen Effekt entspricht (engl.: aliasing), Rechnung zu tragen (TAUBENHEIM 1969, p. 264).

Bei Zeitreihen mit Erhaltungsneigung erklären die ersten Harmonischen, da der zweite Wert der Zeitreihe vom ersten als Folge der Erhaltungsneigung mitbestimmt wird, mehr der Gesamtvarianz als die höheren Harmonischen, denn dritter, vierter und fünfter Wert der Zeitreihe werden weniger durch den ersten Wert mitbestimmt als der zweite. Zur Signifikanzprüfung analysierter Zeitreihen ist demzufolge das „weiße Rauschen“ mit gleichem Varianzanteil auf allen Frequenzen ungeeignet. Eine Modellfunktion die als „rotes Rauschen“ (infolge des hohen Varianzanteils auf den niedrigsten Frequenzen die den größten Wellenlängen entsprechen wird in Analogie zur Optik dieser Begriff in der Literatur gebraucht. Siehe z. B. TAUBENHEIM 1969, p. 229) bezeichnet wird, dient im Falle der Persistenz zur Signifikanzbestimmung (Abb. 11b).

Je mehr Harmonische Berücksichtigung finden, um

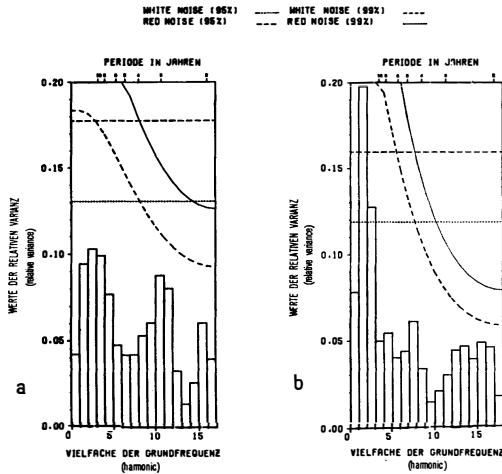


Abb. 11: Varianzspektrum mit Signifikanzgrenzen für die Stationen  
 a) Touleple, 6.34 N 8.24 W (Beispiel für „weißes Rauschen“)  
 b) Sakete, 6.43 N 2.40 E (Beispiel für „rotes Rauschen“)  
 Beobachtungszeitraum: 1921–1973  
 Power spectrum with significance boundary for the stations  
 a) Touleple, 6.34 N 8.24 W (example for “white noise”)  
 b) Sakete, 6.34 N 2.40 E (example for “red noise”)  
 observation period: 1921–1973

Tabelle 4: Signifikante Varianzspektren für die Stationen Westafrikas und die Großwetterlagen Europas nach Periodenbereichen (Endjahr 1972/73)  
 Significant power spectra for the stations of West Africa and the „Grosswetterlagen“ in Europe by periods (terminal year 1972/3)

Station	Persi- stanz	Signifikant im Periodenbereich (Jahre)
Adjohon	0.	24.1
Agbovill	0.	7.7
Athieme	0. 2.7	
Bamako Aer.	1. 3.5	
Bemberek	0. 2.1	
Bobo Diol.	0.	17.4 28.8
Boromo	0.	14.1
Bonake	0.	12.5 17.4++
Bongouni	1. 2.1/2	
Boukombe	1.	23.1
Cotonou	0.	24.1
Dabakala	0. 2.5	
Dakar Ho.	0. 3.0	
Daloa	1. 2.7	
Djoujon	1.	14.1
Dogoudou	1. 2.2	
Fada n. G.	1. 2.5/7	
Freetown	1. 2.4/5	36.8
Gao	0. 3.0	
Houunde	0. 3.3	
Kabara	0.	7.7
Kaolack	0.	25.1

Station	Persi- stanz	Signifikant im Periodenbereich (Jahre)
Kaya	0.	14.8
Kayes	1.	32.0
Kedougou	0.	14.8
Khartoum	0.	6.6 7.6
Kidira	0.	25.1
Koutiala	0.	24.1
Lagos	0.	32.8
Leo	0.	5.6
Maiduguri	0.	15.5 26.1
M. Beulac	0.	8.1
N. Guigmi	0.	24.1
Niamey	0.	18.0
Nikki	1. 2.1	
Ougadougou	1. 2.5/6++	
Ouidah	0.	24.1
San	0. 3.6 4.0	
Sassandra	0.	24.1
Say	1. 3.6	
Seguela	0. 2.5 2.7++ 3.0	
Tambacounda	0.	14.1
Tenkodog	1. 3.3 3.6	
Saint Louis	1.	5.0
Tougan	0.	14.1
Yang Yang	0.	8.1
Zagounda	0.	14.1
WZ	0. 3.1	
WS	1. 3.5	22.6
WW	0. 2.2/3	
SW	1. 2.9 3.0	35.6++
BM	0. 2.1	35.6++
TRW	0.	35.6++
HFZ	0. 3.1	

++: Signifikant mit 1%iger Irrtumswahrscheinlichkeit; sonst 5%ige Irrtumswahrscheinlichkeit

so größer wird die Genauigkeit der Periodenbestimmung. Die endliche Länge (in der Regel etwa 50 Jahre) der verfügbaren Niederschlagsreihen gestattet nur die Berücksichtigung von maximal n/2 Harmonischen. Andererseits ist die Stabilität des Spektrums, das heißt die Gültigkeit der Spektrumaussagen auch über den Beobachtungszeitraum hinaus, abhängig von dem Verhältnis m/n. Während die von MITCHELL (1969, p. 42) ausgewählten Beispiele von einem Verhältnis 1/3 ausgehen, ist nach TAUBENHEIM (1969, p. 260) erst ein Verhältnis von 1/20–1/10 hinreichend für eine wünschenswerte Stabilität des Spektrums. Bei den hier besprochenen Jahresreihen wird von einem Verhältnis von 1/3 ausgegangen. Um trotz der geringen Stabilität die Ergebnisse vergleichbar zu halten, wurde die Beobachtungsperiode für alle Stationen nahezu gleich gewählt (Endjahr 1972/73). In Tabelle 4 sind die Ergebnisse für die Stationen zusammengestellt, bei denen signifikante Periodizitäten mit Hilfe der Spektrumanalyse nachgewiesen werden konnten.

Eine Durchsicht der Tabelle zeigt, daß die „Southern Oszillation“ (ca. 2,3 Jahre), die sich im Bodendruckfeld durch eine Intensitätsabnahme des nordhemisphärischen Hochdruckgürtels über Nordafrika und Asien in Verbindung mit einer Intensitätszunahme der pazifischen Antizyklonen beiderseits des Äquators ausdrückt, in großer Häufigkeit nachzuweisen ist. In der nordhemisphärischen Westwindzone kann entsprechend der „Southern Oszillation“ ein Wechsel vorherrschend zonaler und meridionaler (blocking) Wetterlagen beobachtet werden. Vorliegende Untersuchung bestätigt besonders diese Beziehung. Mit einer 5%igen Irrtumswahrscheinlichkeit läßt sich für den Zeitraum von 1881–1973 aus den Auftrittshäufigkeiten der GWL eine 2,2- bis 2,3jährige Periodizität für die winkelförmige Westlage (WW), die durch ein blockierendes Hoch über Rußland gekennzeichnet ist, nachweisen. Die gemischte Zirkulationsform der Wetterlage „Hochdruckbrücke über Mitteleuropa“ (BM) weist eine 2,1jährige signifikante Periodizität auf. Das steht im Einklang mit den Untersuchungen von DAVIS (1967) die zeigen, daß Sommer mit überdurchschnittlich hoher Sonnenscheinstundenzahl und überdurchschnittlich hohen Maximumtemperaturen mit den ungeraden Jahren zusammenfallen. Eine Periodizität von 2,1 Jahren (LAMB 1972, p. 209) führt alle 30 Jahre (1870, 1900, 1934, 1964) zum Wechsel dieser Erscheinung auf die geraden bzw. ungeraden Jahre. Die GWL BM und ihre Periodizität kann als Ursache dieser Erscheinung angesehen werden und ist mit einiger Wahrscheinlichkeit mit der „Southern Oszillation“ gekoppelt.

An 30% der Stationen, die eine signifikante Periodizität zeigen (Tab. 4), kann ein Einfluß der „Southern Oszillation“ nachgewiesen werden. Dabei wird mit LANDSBERG (1962) angenommen, daß sich die „Southern Oszillation“ in den Klimaparametern im Periodenbereich 1,9–2,7 auswirken kann.

Der Periodenbereich 2,9–3,3 Jahre kann auf keine bekannte physikalische Ursache zurückgeführt werden. Eine 5%ige Irrtumswahrscheinlichkeit, die für diesen Periodenbereich nachgewiesen wurde, reicht nicht aus (MITCHELL 1966, p. 41), sie als signifikant anzusehen. Die Perioden 3,5, 3,6 sowie 5,0 und 5,6 Jahre lassen sich als höhere Harmonische des 11- bzw. 22/23jährigen Sonnenfleckenzyklus deuten. Für die Perioden 7,7 und 8,1 Jahre kann dies nicht angenommen werden, da der Sonnenfleckenzyklus in diesem Jahrhundert bei 10–10,5 Jahren liegt. Vielmehr kann angenommen werden, daß es sich um höhere Harmonische des 24,1- bzw. 23,1jährigen Zyklus handelt, der noch beschrieben wird.

Der 14,1- bzw. 14,8jährige Zyklus, der an 7 Stationen beobachtet wird, genügt nicht den erhöhten Signifikanzkriterien, die für bisher nicht bestätigte Periodizitäten zu fordern sind.

Die Perioden zwischen 17,4 und 25,1 Jahren sind ebenso wie die noch längeren Perioden infolge der Zu-

ordnung breiter Periodenintervalle zu den jeweiligen Harmonischen nicht eindeutig. So ist beispielsweise die erste Harmonische – im Falle von insgesamt 18 Harmonischen – der Periode 25,1, die zweite jedoch 14,8, die dritte 10,5 Jahren zugeordnet. Eine genauere Bestimmung der Periodizität durch Autokorrelationskoeffizienten ist infolge der Kürze der Zeitreihen nicht mit Erfolg durchführbar. Möglicherweise steckt hinter diesem breiten Periodenintervall der doppelte Sonnenfleckenzyklus von 22/23 Jahren. Eine endgültige Festlegung ist an Hand des vorliegenden Datenmaterials nicht möglich.

LAMB (1972, p. 242) gibt ein ähnlich breites Periodenintervall für das Auftreten von Westwinden über England an, die ihrerseits bevorzugt an das Vorherrschen zonaler bzw. gemischter Zirkulationsformen über Europa gebunden sind. Ein Zusammenhang zwischen der Westwindhäufigkeit über England und der Niederschlagshöhe in Randtropen und Tropen wird auch durch die Arbeiten von WINSTANLEY (1973) nahegelegt.

Bemerkenswert erscheint das Auftreten einer Periodizität von ca. 35,6 Jahren bei einigen GWL Europas (SW-Lagen, Hochdruckbrücke über Mitteleuropa und Trog über Westeuropa). Bei den 31 berücksichtigten Harmonischen entspricht der ersten Harmonischen eine Periodizität von 35,6, der zweiten von 22,6 Jahren. Möglicherweise spiegelt die gefundene im 1%-Niveau signifikante Periode einen näherungsweise 30jährigen Zyklus wider, der bereits im Zusammenhang mit der Hochdruckbrücke über Mitteleuropa erwähnt wurde.

Die räumliche Verteilung der nachgewiesenen signifikanten Perioden ist näherungsweise in Abb. 12 dargestellt. Es zeigt sich, daß die „Southern Oszillation“-Periodizität mit einer Ausnahme im Bereich des von der Südhemisphäre ausgehenden Höhenrückens (500 mb) liegt. Im Gebiet der nördlichsten Position dieses Rückens und seiner möglichen polwärtigen Fluktuationen läßt sich gehäuft der Sonnenfleckenzyklus nachweisen. Diese geographische Verteilung der beiden wichtigsten Zyklen macht eine starke südhemisphärische Einflußnahme wahrscheinlich.

Obwohl die 14,1- bzw. 14,8jährige Periode infolge des Fehlens einer adäquaten bekannten physikalischen Ursache als nicht signifikant angenommen wurde, ist die räumliche Verbreitung dieser Periodizität östlich und westlich des Nullmeridians mit einem Wechsel von westlicher zu östlicher Länge im Bereich des südhemisphärischen Höhenrückens bemerkenswert.

Die räumliche Verteilung des Auftretens der 18- bis 25jährigen Periodizität ist so dispers (Abb. 12), daß eine gemeinsame Ursache nicht zu erschließen ist. Lediglich im Küstenbereich Dahomeys ist ein gehäuftes Auftreten der 24,1jährigen Periode zu beobachten.

Einige der genannten Periodizitäten lassen Zusammenhänge zu den Sonnenfleckenzahlen vermuten. Die Kreuzkorrelation zwischen den Niederschlagsreihen Westafrikas und den Sonnenfleckenzahlen zeigen, daß



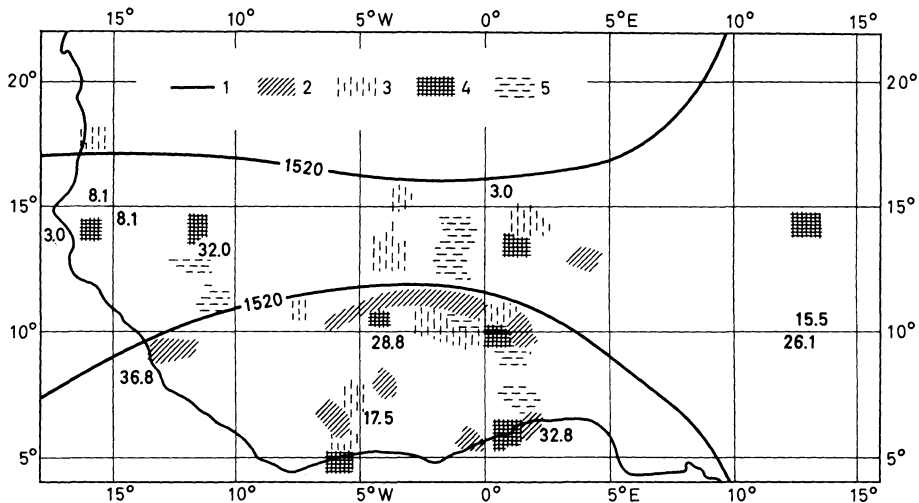


Abb. 12: Räumliche Verteilung der signifikanten Periodizitäten in erster Näherung

1 Höhenlinien der 850-mb-Druckfläche in gpm für Juli (langjähriger Mittelwert nach THOMPSON, 1965); 2 Periodizitätenintervall der „Southern Oszillation“; 3 Periodizitätenintervall des Sonnenfleckenzyklus z. T. hergeleitet aus den höheren Harmonischen; 4 18- bis 25jährige Periodizität; 5 14- bis 15jährige Periodizität; singulär auftretende Periodizitäten sind in Zahlen (Jahre) angegeben.

Spatial distribution of significant periodicities in first approximation

1 altitude lines of the 850 mb pressure surface in gpm for July (long-period mean value after THOMPSON 1965); 2 periodicity interval of the 'Southern Oscillation'; 3 periodicity interval of the sunspot cycle, partly derived from the higher harmonic; 4 18–25 year periodicity; 5 14–15 year periodicity; singly occurring periodicities are given in figures (years).

10- bis 12jährige Zeitverschiebungen zwischen diesen Zeitreihen bei einigen Stationen zu signifikanten Kreuzkorrelationen führen (Bakel +0,48, Freetown +0,32, M. Beulac +0,36, Yang Yang +0,36, Wetterlagen: HM +0,30). Gleichzeitig wurde eine Kohärenzanalyse mit den Datenreihen nach dem von TAUBENHEIM (1969, p. 247) und DOBERITZ (1968, p. 112/9) beschriebenen Verfahren durchgeführt. Die Kohärenz stellt ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Zeitreihen dar. Sie wird für unterschiedliche Phasenverschiebungen der beiden Zeitreihen gegeneinander bestimmt. Im Falle der Überzufälligkeit dieser Ähnlichkeiten bei bestimmten Phasenverschiebungen gibt letztere an (vorgegeben in Jahren), um wieviel Jahre die Basisstation (Sonnenfleckenzahlen) den in der Tabelle 5a genannten Stationen vauseilt (+), bzw. nachhinkt (-). Ob die Schwingungsvorgänge in beiden Zeitreihen mit gleichem oder entgegengesetztem Vorzeichen ablaufen, kann an der Phasendifferenz, ausgedrückt in Altgrad, abgelesen werden (90–270°: entgegengesetztes Vorzeichen; 0–90° und 270–360°: gleiches Vorzeichen).

Die wenigen Stationen, die bei der Kohärenzanalyse signifikante Phasendifferenzen zu den Sonnenflecken-daten ausweisen, deuten an, daß, wenn überhaupt Zusammenhänge bestehen, diese nur sehr schwach ausgebildet sein können. So sind die Niederschlagswerte von Fatick signifikant und in Phase mit den Sonnenflecken-zahlen (tiefgesetztes +: signifikant im 5%/o-Niveau; ++: signifikant im 1%/o-Niveau; (+): Zeit-

Tabelle 5a: Phasendifferenz in Jahren für signifikante Periodenbereiche (Sonnenfleckenrelativzahlen – Niederschlagsdaten Westafrika) im Beobachtungsintervall 1918–1973

Phase relations in years for significant periodicities (relative sunspot numbers – precipitation data for West Africa) for the period 1918–1973

Fatick	– 1,4 <sub>++</sub> Jahre (+)	
Freetown	– 2,6 <sub>+</sub> Jahre (–)	
Kayes	– 16,2 <sub>+</sub> Jahre (–)	– 33,2 <sub>+++</sub> Jahre (–)
Kedougou	– 1,7 <sub>++</sub> Jahre (–)	– 2,0 <sub>++</sub> Jahre (–)
Khartoum	+ 15,5 <sub>+</sub> Jahre (–)	
Niamey	– 2,0 <sub>++</sub> Jahre (–)	– 1,3 <sub>++</sub> Jahre (+)
Podor	– 2,0 <sub>++</sub> Jahre (–)	
Saint Louis	+ 17,3 <sub>+++</sub> Jahre (+)	
Tivahuan	+ 0,9 <sub>++</sub> Jahre (+)	
Zinder	– 1,2 <sub>++</sub> Jahre (–)	– 2,6 <sub>++</sub> Jahre (+)

reihen in Phase; (–): Zeitreihen in Gegenphase), wenn man ein Nachhinken der Sonnenflecken-daten um 1,4 Jahre annimmt. In Freetown laufen die Niederschlagsdaten bei umgekehrtem Schwingungsverhalten den Sonnenflecken-zahlen sogar um ca. 2,6 Jahre vor, in Niamey, Zinder, Kedougou und Podor sind es schließlich nur 2,0–2,6 Jahre, ein Wert, der an die „Southern Oszillation“ erinnert. Auffällig sind die Phasenverschiebungen zwischen 15,5 und 17,3 Jahren in Kayes, Khartoum und Saint Louis. Da es sich ein-

mal um positive (Khartoum) und einmal um negative (Kayes) Verschiebungen handelt, stößt man erneut auf eine näherungsweise 30jährige Periodizität. Es ist interessant, daß die uns bekannten Dürren im Sahel ebenfalls im Mittel eine ca. 30jährige Periodizität aufweisen (1639–1643, 1681–1687, 1711–1716, 1738–1743, 1771–1775, 1829–1834 [ $2 \times 29$  Jahre], 1866–1880, 1896–1903/4, 1910/11–1914/15 [ $0,5 \times 29$  Jahre], 1941/42 und 1948/1949, 1968–1973, nach PLOTE 1974). Dabei kann es geschehen, daß ein 30-Jahres-Zyklus dürrelos bleibt, während eine Halbierung dieser Zeitspanne in einem Falle mit Dürren im Sahelraum verbunden war. Damit scheint der häufig in dieser Untersuchung gefundenen Periode von 14,1 bzw. 14,8 Jahren, trotz fehlender physikalischer Begründung, eine besondere Bedeutung zuzukommen. Die 7,7- bzw. 8,1jährige Periode könnte möglicherweise als Harmonische der 14- bis 15jährigen bzw. 30jährigen Periode angesehen werden, während die 20- bis 25jährige Periodizität eine Hervorhebung jedes 3. Zyklus der 7- bis 8jährigen Periodizität sein könnte (Aliasingeffekte ausgeschlossen).

Tabelle 5b: Phasendifferenz in Jahren für signifikante Periodenbereiche (Sonnenfleckenrelativzahlen – Wetterlagenhäufigkeit GWL) im Beobachtungsintervall 1918–1973

Phase relations in years for significant periodicities (relative sunspot numbers – frequency of circulation types GWL) for the period 1918–1973

IWA	– 4,1 <sub>+</sub> Jahre(–)	
WZ	– 20,0 <sub>++</sub> Jahre(+)	
WS	– 18,3 <sub>++</sub> Jahre(+)	– 1,5 <sub>+</sub> Jahre(+)
WW	– 2,1 <sub>++</sub> Jahre(–)	
SW	+ 1,3 <sub>++</sub> Jahre(+)	– 3,7 <sub>++</sub> Jahre(–) + 1,0 <sub>++</sub> Jahre(+)
NW	– 18,4 <sub>++</sub> Jahre(+)	
HM	+ 0,8 <sub>++</sub> Jahre(+)	
TM	– 12,3 <sub>++</sub> Jahre(+)	
TRM	+ 2,7 <sub>++</sub> Jahre(–)	

Die signifikanten Kohärenzen zwischen den Sonnenfleckendaten und den Wetterlagenhäufigkeiten (Tab. 5b) führen zu Phasendifferenzen von 0,8–20 Jahren. Es wird besonders deutlich, daß zwischen dem Auftreten der Sonnenflecken und der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen immer eine Zeitverschiebung besteht. 1–2,7 Jahre treten besonders häufig als Zeitverschiebung auf. Das bedeutet aber, daß maximale Sonnenfleckenzahlen nicht mit gleichzeitig in maximaler Häufigkeit auftretenden speziellen Wetterlagen verbunden sind, sondern die maximalen Wetterlagenhäufigkeiten vielmehr 1–2,7 Jahre vor bzw. nach den Extremwerten der Sonnenflecken auftreten.

BAUR scheint in diesem Zusammenhang den Nachweis erbracht zu haben (LAMB 1972, p. 18), daß die Strahlungsintensität der Sonne im Laufe eines Sonnenfleckenzyklus eine doppelte Periode durchläuft. Die

vier auftretenden Extremwerte sind von Sonnenfleckenzyklus zu Sonnenfleckenzyklus wechselnd durch Zeitintervalle von 2–3,5 Jahren getrennt. Das extreme Maximum ist vom extremen Minimum durch ein 7- bis 8jähriges, das extreme Minimum vom extremen Maximum hingegen durch ein 1- bis 3jähriges Zeitintervall getrennt.

KONDRATIEV und NIKOLSKY (zit. nach LAMB 1972, p. 18) versuchen den Nachweis, daß maximale Sonnenstrahlungsintensitäten mit Sonnenfleckenzahlen zwischen 80–100 einhergehen. BAUR gelingt es zu belegen, daß der Witterungscharakter des Sommers und Winters in Mitteleuropa, welcher bestimmt wird durch die Häufigkeit meridionaler und zonaler Zirkulationsstrukturen in diesen Jahreszeiten, eine Art doppelter Oszillation im 11jährigen Sonnenfleckenzyklus seit 1750 zeigt. Die Ergebnisse der hier beschriebenen Kohärenzanalyse lassen sich ebenfalls in diesem Sinne interpretieren.

Eine Möglichkeit, diesen Denkansatz auf das vorliegende Datenmaterial zu beziehen, besteht in einer Transformation der Sonnenfleckendaten derart, daß die monatlichen Sonnenfleckenzahlen des Intervalls 80–100 gleich 100, alle über und unter 80–100 liegenden Sonnenfleckenzahlen in Zehnerklassen zusammengefaßt abnehmenden Werten kleiner 100 zugeordnet werden.

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse einer Spektrumanalyse für die transformierten und nichttransformierten Sonnenfleckenzahlen einander gegenübergestellt. Im Fall der nichttransformierten Sonnen-

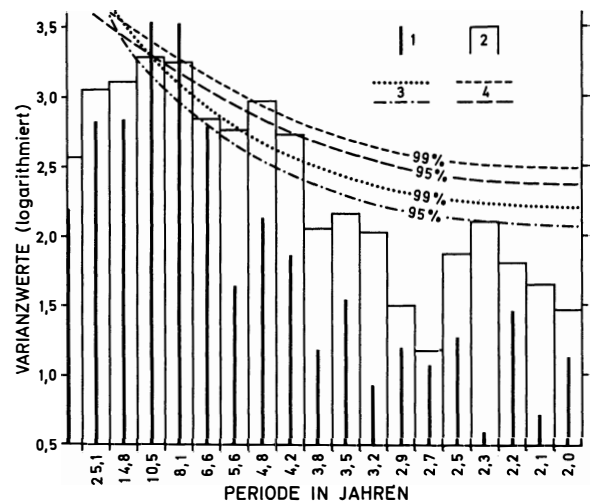


Abb. 13: Vergleich des Varianzspektrums der 1/3 nicht transformierten Sonnenfleckenrelativzahlen; 2/4 transformierten Sonnenfleckenrelativzahlen für den Zeitraum 1918–1973 jeweils mit Signifikanzgrenzen  
Comparison of the power spectrum of 1/3 non-transformed relative sunspot numbers; 2/4 transformed relative sunspot numbers for the period 1918–1973 with limits of significance

fleckenzahlen ist bei 2,2 und 3,5 Jahren ein nicht-signifikanter kleiner Buckel erkennbar, signifikant im 99,75<sup>0</sup>/<sub>0</sub>-Niveau ist die Quasiperiode bei 10,5 und 8,1 Jahren.

Die transformierten Sonnenfleckenzahlen weisen eine nicht signifikante aber deutliche Quasiperiode bei 2,3 und 3,5 Jahren auf. Signifikante Periodenlängen liegen bei etwa 4,8 Jahren (99<sup>0</sup>/<sub>0</sub>) und 8,1 Jahren (95<sup>0</sup>/<sub>0</sub>). Die 10,5jährige Periode ist zwar deutlich erkennbar, bleibt aber knapp unter der 95<sup>0</sup>/<sub>0</sub>-Signifikanzgrenze.

*Tabelle 5c: Signifikante Kreuzkorrelationskoeffizienten für eine Zeitverschiebung von +/- (14-18) Jahren sowie Phasendifferenz in Jahren für signifikante Periodenbereiche im Beobachtungsintervall 1918-1973 (Transformierte Sonnenfleckenzahlen - jährliche Niederschlagssummen Westafrika)*

Significant cross-correlation coefficients for a temporal shift of  $\pm$  (14-18) years and phase relations in years for significant periodicities for the period 1918-1973. (Transformed sunspot numbers - annual precipitation totals West Africa)

	- (14-18)	+ (14-18)	Ph. Diff.
Bathurst	0,49	—	
Bobo Diol.	0,31	0,40	+ 17,4 <sub>++</sub> Jahre (+)
Dagana	0,35	—	
Dakar Ho.	0,37	—	- 2,5 Jahre (-)
Fatick	0,34	0,44	- 13,7 <sub>++</sub> Jahre (+)
Foundiou	0,37	—	- 2,0 <sub>+</sub> Jahre (-)
Freetown	—	0,43	- 6,5 <sub>+</sub> Jahre (-)
Kano	—	0,45	
Lagos	—	0,35	- 29,2 <sub>+</sub> Jahre (-)
Louga	0,44	0,42	
Maiduguri	0,34	0,29	
M. Beulac	0,45	—	- 2,7 <sub>+</sub> Jahre (-)
Matam	0,32	—	
Sedhiou	—	0,34	
Thies	0,36	0,33	
Saint Louis	0,30	0,32	
Tivahuan	0,38	0,31	
Yang Yang	0,44	—	- 2,4 <sub>++</sub> Jahre (-)
Zinder	—	0,45	
WA	—	0,45	
WS	—	0,42	
HM	—	—	+ 2,2 <sub>+</sub> Jahre (+)
BM	—	—	+ 4,3 <sub>+</sub> Jahre (+)

Die durchgeführte Kreuzkorrelation zwischen den transformierten Sonnenfleckenzahlen und den vorliegenden Niederschlagsdatenreihen sowie den Häufigkeiten der GWL der Periode 1918-1973 führte zu den in Tabelle 5c zusammengestellten signifikanten Korrelationskoeffizienten für das Verschiebungsintervall +/- (14-18) Jahre.

Im Falle vorliegender Erhaltungsneigung wurden die Korrelationskoeffizienten zum Vergleich angeführt. Sie können infolge der Persistenz - abgesehen

vom Vorzeichen - nicht interpretiert werden (TAUBENHEIM 1969, p. 123).

Eine Zeitverschiebung der Stationszeitreihen gegenüber der transformierten Sonnenfleckerei um +/- 1-3 Jahre führt bei vielen Stationen zu negativen Korrelationskoeffizienten, die in der Mehrzahl signifikant mit 5- bis 1<sup>0</sup>/<sub>0</sub>iger Irrtumswahrscheinlichkeit sind. Ebenso deutlich führt eine positive bzw. negative Zeitverschiebung von 14-18 Jahren zu ausnahmslos positiven, oft signifikanten Korrelationskoeffizienten (Tab. 5c).

Neben dieser generellen Tendenz, die an nahezu allen Stationen zu beobachten ist, treten von Station zu Station wechselnd weitere signifikante Zeitverschiebungen zwischen 4-8 Jahren hervor. Keine dieser Verschiebungen setzt sich aber signifikant über das gesamte Verschiebungsintervall durch.

Eine ebenfalls durchgeführte Kohärenzanalyse weist die in der letzten Spalte der Tabelle 5c angeführten Zeitverschiebungen als signifikant aus. Nur für Lagos erweist sich eine ca. 30jährige Phasenverschiebung als bestimmend. Auffällig bleibt jedoch die Signifikanz einer 13,7- bzw. 17,4jährigen Phasenverschiebung in Fatick und Bobo Diolasso.

Die Transformation der Sonnenfleckendaten gestattet nicht den Entwurf eines Erklärungsmodells. Dennoch lassen die Ergebnisse Zusammenhänge vermuten, die auf eine ca. 14- bis 18- und 30- bis 35jährige Periodizität hinweisen, welche über den Beobachtungszeitraum hinaus Gültigkeit haben könnte. Weitere Untersuchungen mit längeren Zeitreihen können hier möglicherweise zur Klärung beitragen.

Für die finanzielle Unterstützung dieser Untersuchung danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

#### Literatur

- CAPPEL, A.: Die Großwetterlagen in extremen Naß- und Trockenmonaten. Meteorol. Rdsch. 28, 1975, p. 71-82.
- DAVIS, N. E.: The summers of northwest Europe. Meteorol. Magazine 96, 1967, p. 178-187.
- DOBERITZ, R.: Kohärenzanalyse von Niederschlag und Wassertemperatur im tropischen Pazifischen Ozean. Berichte des Deutsch. Wetterdienstes 112, Bd. 15, 1968.
- HEYER, E.: Witterung und Klima. Leipzig 1963.
- LAMB, H. H.: Climate: Present, Past Future. Vol. 1, London 1972.
- LANDSBERG, H. E.: Biennial pulses in the atmosphere. Beitr. z. Phys. d. Atmosph., Vol. 35, 1962, p. 184-194.
- MITCHELL, J. M.: Climatic change. WMO-Technical Note No. 79, Genf 1966.

- PLOTE, H.: Die Trockenheit im Sahelgürtel. Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 6. 10. 1973, Frankfurt.
- TAUBENHEIM, J.: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Leipzig 1969.
- THOMPSON, B. W.: The climate of Africa. Nairobi, London, New York 1965.
- WINSTANLEY, D.: Rainfall patterns and General Circulation. Nature, Vol. 245, Sept. 28, 1973, p. 190–194.
- : Voraussage von Regen. Klimaschwankungen in Perioden von Jahrzehnten und Jahrhunderten. VDI-Nachrichten No. 38, vom 20. 9. 1974.
- Daten:
- HESS, P., BREZOWSKY, H.: Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutsch. Wetterdienstes 113, Bd. 15, 1969.
- LINKE, F., BAUR, F.: Meteorologisches Taschenbuch. Bd. I, 2. Aufl., Leipzig 1962.
- U.S. Department of Commerce: World Weather Records. Bd. 5, Africa, Washington, D.C., 1967.
- U.S. Department of Commerce: Monthly climatic Data for the world. WMO, Asheville, N.C., 1960–1973.

## DIE CHLORIDKONZENTRATION IN DEN GEWÄSSERN DER OBERRHEINEBENE UND IHRER RANDGEBIRGE

Mit 1 Abbildung und 1 farbigen Karte (Beilage VIII)

WERNER KRAUSE und ROLAND CARBIENER

*Résumé:* La teneur en chlorures des eaux du fossé rhénan et de ses montagnes bordières. Utilisation comme traceur hydrologique. (Période 1968–72 pour la plaine, 1972–75 pour la montagne.)

Dans le fossé rhénan, l'activité minière du bassin potassique provoque, par des déversements massifs de chlorure de sodium, d'intenses pollutions ponctuelles aboutissant à une considérable sursalure tant d'un certain nombre de cours d'eau (Rhin, Ill . . .) que de secteurs déterminés des nappes phréatiques.

La teneur en chlorures anormale singularise ainsi les eaux en question et permet de les différencier aisément des veines aquatiques ayant d'autres provenances. La pollution chlorurée peut donc être utilisée comme traceur hydrologique à l'instar de la méthode de la chloruration artificielle d'eaux phréatiques utilisée en hydrogéologie. Le dosage des chlorures et l'expression cartographique des résultats obtenus permettent de tirer des conclusions tant sur la circulation des franges supérieures des nappes phréatiques, et d'éventuelles eaux «hypodermiques» cheminant dans les sous-sols, que sur les corrélations entre les eaux de surface d'une part et les eaux de surface et les nappes d'autre part.

Notre étude englobe l'ensemble des eaux directement accessibles de la plaine du Rhin entre Bâle et Karlsruhe: rivières, étangs, sources, puits, gravières. La plaine rhénane post-glaciaire et la basse terrasse furent étudiées entre 1968 et 1972. Entre 1972 et 1975, l'étude fut étendue à l'ensemble des bassins versants, c'est-à-dire les montagnes et leurs piémonts dans le secteur concerné (Bâle-Karlsruhe).

Les résultats obtenus, exposés sommairement lors du Congrès «EUREAU» à Strasbourg en mars 1972, sont visualisés par la cartographie; ils peuvent se résumer comme suit:

L'eau des *massifs cristallins (Vosges, Forêt Noire)* et de leurs bordures *permo-triasiques gréseuses* présente des taux de chlorures particulièrement bas, ne dépassant que rarement 15 mg/l (exprimés en Cl' comme tous les autres chiffres cités). Certaines exceptions sont dues soit à des pollutions industrielles, soit à l'apport d'affluents d'origine hydrogéologique différente: la Zinsel du Sud par exemple

roule des eaux anormalement chlorurées, originaires du Muschelkalk lorrain à travers le plateau gréseux des Vosges du Nord (elle est en plus sujette depuis quelques années à de graves pollutions industrielles à la tête de son bassin).

Dans la zone des auréoles et champs de fractures *mésozoïques* formant les collines du piémont des Vosges et de la Forêt-Noire à la charnière du fossé rhénan, la concentration en chlorures des eaux autochtones s'élève. Elle oscille autour de taux moyens de 20 à 40 mg/l.

Les couches *salifères du Keuper* de Lorraine provoquent des bonds localisés de la concentration chlorurée de certains cours d'eau du bassin de la Sarre, dans le Nord Ouest de la région étudiée (exemple: Sarre à partir de la saline de Salzbrunn, près de Sarralbe).

Les ondulations *tertiaires* (oligocène) partiellement salifères de l'ex-bassin pétrolifère de Pechelbronn donnent également naissance à quelques cours d'eau fortement chlorurés, renforcés par les effluents salés jaillissant de certains forages (Morsbronn). Du côté badois par contre, les sources salifères sont bien plus rares.

La région des collines au pied de la montagne étant très densément peuplée, les cours d'eau y sont généralement pollués, voire fortement pollués. Cette pollution peut se traduire entre autres par une hausse des concentrations salines, faisant apparaître certains fossés, canaux et ruisseaux comme de véritables corps étrangers par rapport à l'environnement hydrogéologique naturel visualisé par la carte.

La répercussion de la *pollution saline due au bassin potassique* au Nord Ouest de Mulhouse a particulièrement retenu les auteurs. Les résultats permettent un complément d'information par rapport aux cartes de la pollution de la nappe phréatique profonde, récemment publiée par les services géologiques d'Alsace (1973).

Les eaux de surface affectées par des déversements *directs* de saumure sont l'Ill, la vieille Thur et quelques diffluences de cette dernière sur son cône de déjection würmien, enfin et surtout le Rhin à l'aboutissement du «saumodu» d'eaux résiduaires au Sud de Fessenheim. A l'aval immédiat des déversements, on constate que la pollution