

**Berichte**  
des  
**Deutschen Wetterdienstes**

**Nr. 112**  
**(Band 15)**

DK 551.501.45:551.577.3:551.526.6

**Kohärenzanalyse von Niederschlag  
und Wassertemperatur  
im tropischen Pazifischen Ozean**

von

ROLF DOBERITZ

(mit 21 Abbildungen und 17 Tabellen im Anhang)

Offenbach a. M. 1968

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

## Inhalt

	Seite
Zusammenfassung .....	3
Abstract .....	3
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen .....	3
1. Einleitung .....	4
2. Das äquatoriale pazifische Trockengebiet und seine Anomalien .....	4
2.1. Allgemeines .....	4
2.2. Anomalien .....	4
2.3. Ursachen der Trockenzone und deren Anomalien .....	5
2.4. Eignung des Niederschlags als Indikator atmosphärischer Zirkulationsverhältnisse .....	6
3. Fragestellung .....	7
4. Spektrum- und Kohärenzanalyse .....	7
4.1. Allgemeines .....	7
4.2. Voraussetzungen .....	8
4.3. Berechnung von Spektrum, Ko- und Quadratspektrum .....	9
4.4. Eigenschaften von Spektrum und Kospektrum .....	10
4.5. Auflösungsvermögen und Stabilität des Spektrums, Mindestlänge der Klimareihen .....	11
4.6. Kohärenz und Phasendifferenz .....	11
4.7. Zufallsbereiche und Signifikanztests .....	12
4.8. Die rechnerische Behandlung des Beobachtungsmaterials .....	12
5. Das Beobachtungsmaterial .....	12
5.1. Niederschlagsbeobachtungen .....	12
5.2. Wassertemperaturreihen .....	13
6. Die Ergebnisse der Kohärenzanalyse .....	13
6.1. Vorbemerkungen .....	13
6.1.1. Übersicht über die durchgeführten Berechnungen .....	13
6.1.2. Die Auswertungsmethode und Darstellung der Ergebnisse .....	13
6.2. Kurze Beschreibung der Niederschlagsspektren .....	14
6.2.1. Regionale Verteilung von Spektrumtypen .....	14
6.2.2. Zur Frage der praktischen Bedeutung klimatologischer Spektren .....	15
6.3. Kohärenz und Phasendifferenz zwischen langen Beobachtungsreihen ..	15
6.3.1. Wechselbeziehungen zwischen Niederschlagsreihen .....	15
6.3.2. Wechselwirkungen zwischen Wassertemperatur und Niederschlag .....	17
6.4. Regionale Ausdehnung kohärenter Wechselwirkungen .....	17
6.4.1. Vorbemerkungen .....	17
6.4.2. Kohärente Beziehungen zwischen Niederschlagsreihen .....	18
6.4.3. Kohärente Beziehungen zwischen Wassertemperaturreihen .....	19
6.4.4. Kohärente Beziehungen zwischen Wassertemperatur- und Niederschlagsreihen .....	19
6.4.5. Zusammenfassende Bemerkungen .....	20
6.5. Phasendifferenzen im Kohärenzgebiet .....	20
6.5.1. Größenordnung der Phasendifferenzen .....	20
6.5.2. Richtung der zeitlichen Verschiebungen .....	21
6.5.3. Phasendifferenzen der Jahresperiode des Niederschlags .....	21
6.5.4. Phasendifferenzen zwischen Wassertemperatur und Niederschlag am selben Ort .....	22
6.5.5. Zusammenfassende Bemerkungen .....	22
7. Ergebnisse .....	22
8. Abschließende Bemerkungen .....	23
Literatur .....	24
Quellennachweis .....	25
Anhang	
Abbildungen .....	A 1 — A 9
Tabellen .....	A 11 — A 25

Anschrift des Verfassers:

Dr. R. Doberitz, 4 Düsseldorf-Nord, Flughafen-Flugwetterwarte.

### Zusammenfassung

Monatswerte von 35 Niederschlagsstationen und einige Wassertemperaturreihen aus dem Zeitraum 1890—1965 wurden mittels der Kohärenzanalyse (cross spectrum analysis) auf statistische Fernbindungen und Phasendifferenzen hin untersucht. Das Hauptinteresse galt den Anomalien der äquatorialen Trockenzone (El-niño-Erscheinung).

Der Vergleich der Niederschlagsspektren wurde durch die Definition verschiedener Spektrumtypen erleichtert. Die Kohärenzanalysen ließen im Pazifik längs des Äquators von der südamerikanischen Westküste bis etwa 165° E eine Zone erkennen, in der alle Stationen untereinander signifikante Kohärenzen ergaben.

Signifikante Phasendifferenzen fanden sich im Periodenbereich um ein Jahr und über zwei Jahre, wobei letztere eine Verlagerung von Anomalien in der äquatorialen Trockenzone von Nord nach Süd zeigten.

Kohärenzanalysen zwischen Niederschlag und Wassertemperatur ergaben einen gleichzeitigen Ablauf der Anomalien oder eine kleine zeitliche Verzögerung der Wassertemperatur.

Die Ergebnisse lassen vermuten, daß bei der Entstehung der Anomalien des äquatorialen Trockengebietes (El-niño-Erscheinung) die Ursachen vor allem in länger anhaltenden atmosphärischen Zirkulationsanomalien zu suchen sind.

### Abstract

Teleconnections and phase relationships of 35 rainfall and a few sea temperature series in the tropical Pacific region for the period 1890—1965 are investigated by means of cross spectrum analysis. Main interest is directed toward anomalies in the dry equatorial belt ("El-Niño"-phenomenon).

Comparison of rainfall spectra was simplified by defining some spectrum types. The cross spectra reveal a region at the Pacific along the equator extending from the west coast of South America towards 165° E where all stations give mutually significant coherencies. Significant phase relations are exhibited by the annual cycle and periodicities above two years, latter indicate a southward propagation of anomalies in the dry region.

Cross spectra between rainfall and sea temperature generally exhibit either a simultaneous march of anomalies or a small time lag of sea temperature after rainfall.

The results suggest a dominant role of atmospheric circulation processes causing anomalies of rainfall and sea temperature in the equatorial Pacific region ("El-Niño"-phenomenon).

### Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

$C_x, C_y$	Autovarianz von x, bzw. y	$S_y$	geglätteter Spektrumschätzwert der y-Reihe
$C_{xy}, C_{yx}$	Kovarianz von x und y	$\tilde{S}_x, \tilde{S}_y$	rohe Spektrumschätzwerte der x-, bzw. y-Reihe
$C_s$	Kovarianzanteil signifikanter Periodenbereiche (meist in %)o)	$S_{xy}$	Kreuzspektrum
$C_{xy}$	geglätteter Kospektrumschätzwert	$T_w$	Monatsmittel der Wassertemperatur der Meeresoberfläche (° C)
$\tilde{C}_{xy}$	roher Kospektrumschätzwert	$x_i$	Beobachtungswerte von R oder $T_w$ , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , als Bezeichnung für Basisstation verwendet
F	Pearson-Fehler des Korrelationskoeffizienten	$x_i^*$	transformierter Originalwert einer Beobachtungsreihe $x_i$ nach Freeman-Tukey
i	Index, $i = 1, 2, 3, \dots, n$	$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert von $x_i$
ITCZ	Innertropische Konvergenzzone	$\bar{x}_{1+}, \bar{x}_{1-}$	gleitende arithmetische Mittelwerte von $x_i$
k	Harmonische, $k = 0, 1, 2, \dots, m$	$y_i, \bar{y}, \bar{y}_{1+}, \bar{y}_{1-}$	entsprechen den Bezeichnungen unter $x_i$ usw., als Bezeichnung für Sekundärstation verwendet
$K^2$	Kohärenzschätzwert	$\alpha$	Phasendifferenz in Grad
$K_{\infty}^2$	wahre Kohärenz	$\beta$	Signifikanzgrenze der Kohärenz $K^2$
Kkf.	Korrelationskoeffizient (Kreuz- -)	$\Delta t$	zeitlicher Abstand der $x_i$ und/oder $y_i$ (Monate)
l	Zeitschritt (Monate)	$\Delta R, \Delta T_w,$ $\Delta x_i, \Delta y_i$	Anomalien; hier absolute Abweichungen vom vieljährigen Monatsmittel, d. h. Jahresgang eliminiert
$l_{50}$	Harmonische, bei der die Spektrumsummenkurve den 50%-Wert überschreitet	$\Delta_r x_i$	relative Abweichungen vom vieljährigen Monatsmittel, Jahresgang eliminiert
m	maximaler Zeitschritt (Monate)	$\epsilon$	Fehler der Phase
$M_r$	relativer Spektrummedian	$\Theta$	Phasenschätzwert
n	Kollektivumfang	$\hat{\Theta}$	wahre Phase
N	Phasenbeziehung negativ = Gegenphase	$\lambda$	Periodenlänge
$N\lambda$	Anzahl der Spektrumschätzwerte mit Perioden > 1 Jahr	$\nu$	Zahl der Freiheitsgrade
p	Überschreitungswahrscheinlichkeit	$\sigma$	Streuung
P	Phasenbeziehung positiv = in Phase	$\tau$	Phasendifferenz in Monaten
$Q_{xy}$	geglättetes Quadratspektrum		
$\tilde{Q}_{xy}$	rohes Quadratspektrum		
r	linearer Autokorrelationskoeffizient		
$r_k$	linearer Kreuzkorrelationskoeffizient		
R	Monatssumme der Niederschlagshöhe (mm)		
s	Harmonische mit signifikanten Kohärenzen $K^2$		
$S_x$	geglätteter Spektrumschätzwert der x-Reihe		

## 1. Einleitung

Im äquatorialen Gebiet des Atlantischen und Pazifischen Ozeans bestehen negative Niederschlags- und Wassertemperaturanomalien, die besonders im Falle des östlichen und zentralen pazifischen Gebietes in ihren Erscheinungsformen ein auf der Erde einmaliges Anomaliegebiet darstellen. Es unterscheidet sich von der übrigen äquatorialen Tropenzone in ökologischer Hinsicht so stark, daß selbst subarktische Fauna im Meere nicht selten ist. Klimatisch sind nicht nur die Trockenheit und zonale Ausdehnung dieser Zone selbst, sondern die meridional sehr starken Gegensätze in der Niederschlags- und Wassertemperaturverteilung interessant. Gelegentliches Auftreten von Starkregenfällen, verbunden mit hohen tropischen Wassertemperaturen, kann besonders im trockenen Küstenstreifen Nordperus und Südecuadors wirtschaftlich katastrophale Auswirkungen zeitigen. Diese Erscheinung ist als „El-Niño“-Phänomen bekannt. Im westlichen Grenzgebiet dieser äquatorialen Trockengebiete sind besonders trockene Jahre, die als eine zeitweilige Ausweitung der negativen Niederschlagsanomaliegebiete nach Westen aufgefaßt werden können, Anlaß zu größeren wirtschaftlichen Katastrophen. Letztere haben im zentralen Pazifik ökonomisch nur untergeordnete Bedeutung, sind aber im atlantischen Raum, der ebenfalls eine äquatoriale Trockenzone aufweist, vom nordostbrasilianischen Trockengebiet her sehr gut bekannt.

Die Korrelationsanalysen von G. WALKER und seine Theorie der „Southern Oscillation“ stellten erste Schritte auf dem Wege der Erklärung dieser Schwankungen dar und ließen erste Hoffnungen auf deren Vorhersagemöglichkeiten aufkeimen. Der Mangel an einer ausreichenden Zahl längerer, homogener Beobachtungsreihen verhinderte eine weitere systematische Untersuchung der geophysikalischen Wechselwirkungen im Bereich des Trockengebietes. Erst in den letzten Jahrzehnten (beginnend in den dreißiger Jahren) wurde das Beobachtungsnetz dichter und gestattete ein erneutes Aufgreifen der damit zusammenhängenden Probleme. So fanden im Bereich des äquatorialen Atlantischen Ozeans EICKERMANN und FLOHN (1) und im Pazifischen Ozean SCHÜTTE (2) bei systematischen Korrelationsanalysen interessante Zusammenhänge, die auf Verschiebungen im zeitlichen Ablauf von Witterungsanomalien verschiedener Art und damit erneut auf die prognostische Bedeutung dieser Beziehungen hinweisen. Arbeiten von J. BJERKNES (3, 4) über die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre deuten ebenfalls darauf hin, daß im zeitlichen Ablauf von Anomalien an verschiedenen Orten mit zeitlichen Verschiebungen zu rechnen ist.

Die sehr hohe Erhaltungsneigung im Bereich des Trockengebietes stellt für die Korrelationsanalyse eine schwer überbrückbare methodische Schwierigkeit dar. Hier bietet sich die im letzten Jahrzehnt zur Praxisreife entwickelte Methode der Kohärenzanalyse (cross spectrum analysis) an, die nicht nur die Signifikanz statistischer Beziehungen zwischen mehreren Beobachtungsreihen trotz Erhaltungsneigung zu prüfen gestattet, sondern gleichzeitig statistisch prüfbare Aussagen über Phasendifferenzen (zeitliche Verschiebungen) macht. Den Phasenbeziehungen im Bereich des äquatorialen Pazifiks gilt in dieser Untersuchung das Hauptinteresse.

Als ausreichende Anzahl langer und kontinuierlicher Beobachtungen stehen aus diesem Gebiet nur Niederschlagsbeobachtungen zur Verfügung. Andere Klimaelemente, die möglicherweise als bessere Indikatoren für zeitliche Variationen der allgemeinen Zirkulation hätten verwendet werden können, z. B. Windvektoren oder vertikale Temperaturgradienten, sind nicht verfügbar. Selbst homogene Temperatur- oder Luftdruckreihen stehen nur für wenige Stationen zur Verfügung und würden keine regionale Verallgemeinerung zulassen. Die vieldiskutierten Wechselwirkungen zwischen Was-

sertemperatur und Niederschlag im Trockengebiet lassen sich glücklicherweise dadurch prüfen, daß von Puerto Chicama, Peru, eine lückenlose Wassertemperaturreihe mit Beobachtungen seit 1925 vorliegt, die die wesentlichen Variationen der Wassertemperatur im Perustrom und dem peruanischen Auftriebswassergebiet nach RODEWALD (5) (6) und SCHWEIGGER (7) gut wiederzugeben scheint.

## 2. Das äquatoriale pazifische Trockengebiet und seine Anomalien

### 2.1. Allgemeines

Das äquatoriale pazifische Trockengebiet stellt die westwärts gerichtete Verlängerung des Wüstengebietes der südamerikanischen Westküste dar. Es fällt mit der Zone relativ kalten Oberflächenwassers des Südäquatorialstromes, der Verlängerung des Perustromes, zusammen. Eine ausführliche Beschreibung des Erscheinungsbildes dieser Zone lieferte SCHOTT (8) (9). Von TULLMANN (10) liegt eine ausführliche Untersuchung der Niederschlagsverhältnisse vor. Die atmosphärischen Zirkulationsverhältnisse fanden unter stärkerer Berücksichtigung aerologischer Beobachtungen u. a. ihre Darstellung bei RIEHL (11) (12). Neuere, zusammenfassende Darstellungen der ozeanographischen, meteorologisch-klimatologischen und biologischen Besonderheiten dieser Zone, wie sie z. B. SCHWEIGGER (7) für die Westküste Südamerikas veröffentlicht hat, fehlen bislang.

Im Rahmen dieser Arbeit können nur die hier besonders interessierenden Fragen angedeutet werden. Die folgende Beschreibung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die trockene Zone erstreckt sich von der südamerikanischen Westküste keilförmig nach Westen und erreicht ihre Grenze etwa bei 170° östlicher Länge (Nauru, Ocean Island). Die meridionale Erstreckung ist im Ostteil des Pazifischen Ozeans wegen der fehlenden Inseln und entsprechender stationärer Meßdaten nicht eindeutig festlegbar. Auf der Länge der Marquesas-Inseln (140° W) beträgt sie etwa 10 Breitengrade und unter 180° Länge etwa 7—8 Breitengrade. Die Achse liegt etwas südlich des Äquators (2—3° S). Im Kerngebiet liegen die mittleren Jahresniederschlagshöhen unter 1000 mm. Wenige hundert Kilometer weiter nördlich steigen die mittleren Jahreshöhen des Niederschlags im Bereich der ITC rasch auf Werte von ca. 3000 mm an. Der Südrand des Trockengebietes zeigt im Bereich des mittleren Pazifiks einen nicht ganz so schroffen Übergang, der vor allem wegen zunehmender Beeinflussung der Niederschlagsmengen durch orographische Effekte (Stauregen an den höheren Inseln) verwischt wird.

Das Trockengebiet liegt im Bereich des SE-Passats, der unter dem Äquator vielfach als Ostströmung auftritt. Charakteristisch ist die damit zusammenhängende relativ niedrige Oberflächentemperatur des Ozeans im Ostteil des Trockengebietes. Im zentralen Pazifik liegen die Jahresmittel der Wassertemperaturen allerdings bei tropischen Werten (26—28° C). Die Passatinversion überdeckt offensichtlich das gesamte Gebiet. Selbst über Canton Island wird die Obergrenze der häufig zu beobachtenden Cumulus-Bewölkung gewöhnlich zwischen 1500—2100 m angegeben (13), eine Höhe, die etwa der normalen Lage der Passatinversion im äquatorialen Gebiet entspricht (11). Die regionale Verteilung der Höhe und Intensität der Passatinversion, wie sie aus dem Atlantischen Ozean aufgrund der Meteor-Expedition bekannt ist, ist im Bereich des pazifischen SE-Passats bislang nicht systematisch untersucht worden.

### 2.2. Anomalien

Meteorologisch und ozeanographisch von größtem Interesse sind die in dem Trockengebiet auftretenden Anomalien, die sich im wesentlichen darin äußern, daß sich

Zirkulationsverhältnisse einstellen, wie sie für äquatoriale tropische Breiten normalerweise erwartet werden, d. h. starke Niederschläge und hohe tropische Wassertemperaturen. Diese Anomalien treten in unregelmäßigen Abständen auf und sind meist jahreszeitlich gebunden (Nordwinter), worauf die Bezeichnung „El-Niño“ (spanisch = das Kind, Christkind) zurückgeführt wird. J. BJERKNES (4) hat den Anomaliefall 1957/58 eingehend geschildert und auf die möglichen Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre, sowie die möglichen meteorologischen Fernwirkungen derartiger Anomalien hingewiesen. Eine figürliche Darstellung an Hand der Messungen von Wassertemperatur und Niederschlag des gleichen Zeitraums auf Canton Island gab SCHÜTTE (2). Den Ablauf des „El-Niño“-Phänomens im Allgemeinen schildert für den Bereich der südamerikanischen Westküste mit seinen ozeanographischen, biologischen und meteorologischen Auswirkungen aus eigener Erfahrung SCHWEIGGER (7) ausführlich.

Den Anomalien mit positivem Vorzeichen müssen die mit negativem Vorzeichen gegenübergestellt werden, die im wesentlichen am Nord- und Westrand der Trockenzone von Bedeutung sind. Sie äußern sich u. a. in einem Ausbleiben des jährlichen Niederschlagsmaximums z. B. auf Nauru, Ocean und Fanning Island. Sie sind mit verstärktem SE-Passat und entsprechenden negativen Wassertemperaturanomalien im Bereich des Peru- und Südäquatorialstroms verbunden. TULLMANN (10) hat diese Anomalien in ihrer Auswirkung näher untersucht. Sie wurden für den Bereich des zentralen äquatorialen Pazifiks bereits früher von BROOKS (14), BROOKS und BRABY (15), KNOCH (16), SCHOTT (17) geschildert.

Um einen groben Überblick über die regionale Ausdehnung und Intensität dieser Anomalien zu erhalten, kann man an Hand der Wassertemperaturreihe von Puerto Chicama, Peru, Anomaliejahre herausuchen und aufgrund der hier verarbeiteten Niederschlagsdaten mittlere relative Abweichungen vom vieljährigen Mittel darstellen. Der Zeitraum 1935/65 ist wegen ausreichender Zahl von Beobachtungen dafür am besten geeignet. Aus der Anomalierreihe der Wassertemperaturen in Puerto Chicama wurden sog. Kalt- und Warmwasserjahre herausgesucht, die mit stärkerer bzw. schwächerer Ausbildung des SE-Passats in erster Näherung identifiziert werden können. Als Auswahlkriterien wurden angewendet:

- a) Kaltwasserjahre: Jahresmittel mindestens  $1^{\circ}$  kälter als im vieljährigen Mittel, alle Monate des Jahres mit  $\Delta T_w \leq 0^{\circ}$  und von Januar bis April mindestens zwei Monate mit  $\Delta T_w < -1.0^{\circ}$ . Es ergaben sich die Jahre 1935, 1938, 1950, 1955 und 1962;
- b) Warmwasserjahre: Mindestens 10 Monate mit positiven Anomalien (Ausnahme 1958 mit schwachen negativen Anomalien von September bis Dezember); von Januar bis April mindestens zwei Monate mit  $\Delta T_w > 1.5^{\circ}$ . Es ergaben sich die Jahre 1941, 1948, 1953, 1957 und 1958.

Das Jahr 1958 konnte als typisches El-Niño-Jahr von der Serie der Warmwasserjahre nicht ausgeschlossen werden. Es wird dabei jedoch gleichzeitig die Problematik der Auswahl solcher Jahre deutlich, auf die in diesem Rahmen nicht weiter eingegangen werden kann.

Abb. 1 läßt erkennen, daß in diesen Jahren auftretende positive und negative Niederschlagsanomalien etwa das gleiche Gebiet erfassen. Offenkundig zutage tritt auch die Niederschlagsschaukel zwischen dem Trockengebiet und dem niederschlagsreichen Gebiet südlich  $10^{\circ}$  S im zentralen Pazifik, die SCHOTT (9) näher erläuterte. Die Schwankungen im regenreichen Gebiet erreichen jedoch bei weitem nicht das Ausmaß derjenigen der trockenen Zone und verlieren damit erheblich an Bedeutung, denn die mittlere Jahresniederschlagsmenge

ist hoch genug, um bei einem Fehlbetrag von 10 — 20% noch nicht zu wirtschaftlichen Katastrophen zu führen. Abb. 1 läßt andererseits besser als eine mittlere Niederschlagsverteilung deutlich werden, wie weit das Anomaliegebiet nach Westen ausgreift.

Angesichts der Abb. 1 und Veröffentlichungen über Anomalien großer Ausdehnung, z. B. BJERKNES (4), darf nicht übersehen werden, daß in Einzeljahren durchaus nicht immer der gesamte Bereich der Trockenzone im Perustromgebiet nicht unbedingt gleichzeitig im ganzen Trockengebiet auftreten müssen (z. B. 1925, 1927, 1943) und negative Anomalien im Perustromgebiet nicht immer mit negativen Anomalien im zentralen Teil des Pazifiks verbunden sein müssen (z. B. 1936 und 1946).

Eines der besten Beispiele scheint das Jahr 1925 zu sein, das durch die Wassertemperaturreihe von Puerto Chicama bereits erfaßt wurde, und für das noch die letzten Niederschlagsmessungen von Malden Island zur Verfügung stehen. Malden, Nauru, Christmas und Fanning Island zeigen Jahresniederschlagssummen, die dem Mittelwert entsprechen, während Guayaquil mit 2591 mm Niederschlag und Puerto Chicama mit einem Jahresmittel der Wassertemperatur von  $19.7^{\circ}$  C die höchsten bislang beobachteten positiven Anomalien aufzuweisen haben. Tab. 2 gibt einige Monatswerte wieder, die den Unterschied deutlich werden lassen. Während Malden und Fanning Island noch Andeutungen von positiven Anomalien in den Monaten April bis Juni enthalten, stellt Nauru das Gegenteil dar. Aufgrund der hier vorliegenden Niederschlagsreihen zeichnete sich das darauffolgende Nordwinterhalbjahr (1925/26) im Zentral- und Westpazifik durch erhöhte Niederschläge aus. Die katastrophalen Auswirkungen dieser Anomalie an der südamerikanischen Westküste sind u. a. von KNOCH (18) beschrieben worden. Das Auftreten derartiger Unterschiede weist darauf hin, daß in einzelnen Jahren durchaus nicht mit einer so einfachen Umstellung der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation gerechnet werden kann (z. B. Ausbleiben des SE-Passats), wie sie bislang in der Literatur zur Darstellung gekommen ist.

### 2.3. Ursachen der Trockenzone und deren Anomalien

Die Hauptursache der Trockenheit ungestörter Passatgebiete wird heute in erster Linie in den allgemein vorhandenen Absinkbewegungen der Passatströmung selbst gesehen. Die Absinkbewegungen können u. a. zurückgeführt werden auf die antizyklonalen Strömungsverhältnisse (negative Vorticity), die Schrumpfungsvorgänge einer äquatorwärts bewegten Luftmasse wegen der Divergenz der Längengrade und die abwärts gerichtete Vertikalkomponente der Corioliskraft bei Ostströmung (RIEHL (11), FLOHN (19)). Die Ausbildung der Passatinversion ist somit nicht Ursache der Trockenheit, sondern nur ihre Begleiterscheinung.

In den Gebieten der tropischen Ostküsten, die sich durch Auftriebswasser auszeichnen, wird die Passatinversion durch zusätzliche Abkühlung von der Meeresoberfläche her verstärkt. Die niedrige Temperatur der Wasseroberfläche ist jedoch nicht die alleinige Ursache der Passatinversion, wie man früher annahm.

Das Auftreten äquatorialer Trockengebiete im Bereich des Pazifischen und Atlantischen Ozeans ist nach FLOHN (20) hauptsächlich auf die Asymmetrie der allgemeinen Zirkulation beider Hemisphären zurückzuführen, die über die verstärkte Westwindzirkulation der südlichen gemäßigten Breiten zu einer Nordwärtsverschiebung der subtropischen Hochdruckzellen und des Südteils der tropischen Hadleyzirkulationszelle führt. Die damit zusammenhängende mittlere Lage der ITCZ

zwischen 0 und 10° N läßt u. a. im atlantischen und pazifischen Äquatorgebiet den SE-Pasat um einige Breitengrade auf die Nordhalbkugel übertreten. Selbst während des Nordwinters liegt die ITCZ im Ostteil des Pazifischen Ozeans nördlich des Äquators (ALBRECHT (21), RIEHL (11)).

Die praktisch während des ganzen Jahres im Ostteil des Pazifiks zum Äquator parallel wehenden Passatwinde erzeugen im Meer eine zweiseitig divergente Ekmandrift (Abb. 2), die in Äquatornähe zu einem kalten Auftriebswassergebiet führt und als Hauptursache für die sich von der südamerikanischen Westküste westwärts erstreckende negative Anomalie der Wassertemperatur anzusehen ist (BJERKNES (4)).

Daß nicht allein niedrige Wassertemperaturen die Ursache für die Trockenheit des Äquatorgebietes sind, sondern atmosphärische Strömungsverhältnisse, erhellt auch aus der Tatsache, daß im Westteil des Anomaliegebietes die Wassertemperatur tropische Werte zwischen 26 und 28° aufweist (Tab. 1, Wassertemperaturen von Canton Island). Unter diesen Gesichtspunkten wäre das Auftreten von Anomalien in der Trockenzone in erster Linie auf eine Änderung der atmosphärischen Zirkulationsverhältnisse zurückzuführen, was SCHOTT (9) S. 43) wie folgt formulierte: „Für die unperiodisch starken Regenfälle halte ich, in Übereinstimmung mit BROOKS-BRABY und KNOCH, die zeitweisen Störungen des Passats, also rein atmosphärische Vorgänge, für verantwortlich. Die etwaigen Änderungen im Meerwasser . . . würden nur eine Begleiterscheinung sein. . . .“ Das Zurückführen der Störungen auf rein atmosphärische Ursachen scheint bei SCHOTT der Hauptgrund für die Annahme zu sein, daß diese Anomalien in „West-Ost-Richtung sehr weiträumig, gleichzeitig und gleichsinnig“ auftreten. Offensichtlich ist SCHOTT seinerzeit der hier erwähnte Fall des Jahres 1925 entgangen, denn bei der Auswahl trockener und nasser Jahre wurde von ihm Malden Island zugrundegelegt, das 1925 eine etwa mittlere Niederschlagsmenge empfing.

Den Wassertemperaturen widmete BJERKNES (4) größere Aufmerksamkeit, da hohe Temperaturen als Wärmequelle für den aufsteigenden Ast der Hadleyzirkulation über dem Meer, wie ganz allgemein für den Wärmehaushalt, von Bedeutung sind. Am Beispiel der Anomalie von 1957/58 konnte er zeigen, daß das kältere äquatoriale Auftriebswassergebiet durch einen warmen ostwärts gerichteten Strom, wahrscheinlich den an die Oberfläche getretenen Cromwell-Strom, ersetzt und dadurch die Heizfläche für den aufsteigenden Ast der Hadleyzirkulation wesentlich vergrößert wurde. Damit im Zusammenhang stand eine wesentliche Verstärkung der Zonalströmung über dem NE-Teil des Pazifischen Ozeans, die zu einer bemerkenswerten Veränderung der normalen Lage der barischen Aktionszentren nicht nur im pazifischen, sondern auch im atlantisch-europäischen Raum führte. Analoge Ergebnisse scheinen in den Nordwintern 1940 — 41 und 1952 — 53 aufgetreten zu sein und gaben Anlaß zu der Vermutung, daß die Ursache dafür in der Vergrößerung der äquatorialen Wärmequelle des Ostpazifiks zu suchen ist. Letztere kann ihre Vergrößerung vor allem im Nordwinter erfahren, wenn über dem Südostpazifik die Passatströmung schwach ist und in einzelnen Jahren ganz zum Erliegen kommt. Dann setzt unter der südamerikanischen Westküste und am Äquator der Kaltwasserauftrieb aus und gestattet das Auftreten und die Ausbreitung tropischer Wassertemperaturen im Anomaliegebiet. Offen bleibt bei den von BJERKNES (4) aufgeworfenen Fragen, warum der Südostpassat ausbleibt, warum eine Ausdehnung der äquatorialen Wärmequelle nicht auch den Südteil der Hadleyzelle und damit den Südostpassat verstärkt, und ob überhaupt eine zeitliche Verschiebung im Auftreten der Witterungserscheinungen über der Nordhalbkugel zu

verzeichnen ist. BJERKNES diskutiert keine zeitlichen Abläufe, sondern im wesentlichen gleichzeitige Erscheinungen.

Der Erhöhung der Wassertemperatur widmeten auch ICHIYE und PETERSEN (22) besondere Aufmerksamkeit, als sie die Anomalie des Winters 1957/58 untersuchten. Die dabei mit aller Vorsicht ausgesprochenen Vermutungen über die Erhöhung der Niederschläge stellen ebenfalls die Wassertemperaturen in den Vordergrund, obwohl betont wird, daß eine Abschwächung des SE-Passats die Voraussetzung für die Erhöhung der Oberflächentemperatur des äquatorialen Ostpazifiks ist.

Die Frage des zeitlichen Ablaufs von Wassertemperatur- und Niederschlagsanomalien wurde für den Zeitraum 1957/58 von SCHÜTTE (2) anhand der Klimareihe von Canton Island geprüft. Sie kam zu dem Ergebnis, daß eine Erhöhung der Wassertemperatur durchaus nicht einer Erhöhung der Niederschläge vorausgeht. Berechnungen von Korrelationskoeffizienten mit zeitlichen Verschiebungen von -3 bis +3 Monaten lassen auf gleichzeitiges Auftreten der Anomalien oder sogar ein leichtes Nachhinken der Wassertemperatur gegenüber dem Niederschlag schließen. Selbst Korrelationskoeffizienten zwischen der Wassertemperatur in Puerto Chicama und dem Niederschlag in Canton Island lassen keine einheitlichen zeitlichen Verschiebungen erkennen. Die Frage nach den zeitlichen Verschiebungen und damit nach den möglichen Ursachen für diese Anomalien wurde von SCHÜTTE an Hand verschiedener Niederschlagsreihen mittels Korrelationskoeffizienten erstmals systematisch untersucht. Das Ergebnis zeigt zeitliche Verschiebungen, die entlang des Äquators praktisch null sind und von dort aus in meridionaler Richtung positive Werte annehmen, d. h. daß mit einer Erscheinung zu rechnen ist, die am Äquator ihren Ursprung hat und sich nach Norden und Süden ausbreitet. Dieses Ergebnis läßt sich mit dem Bjerknese-Modell gut vereinbaren. Das eigenartige Verhalten der Korrelationen zwischen Wassertemperatur und Niederschlag und die an Hand des Jahres 1925 weiter oben bereits angedeuteten Unterschiede in der regionalen Ausdehnung der Anomalien lassen jedoch vermuten, daß sich hier Erscheinungen überschneiden, die möglicherweise weit auseinanderliegenden Frequenz- oder Periodenbereichen angehören. So bleibt bei den von SCHÜTTE gefundenen zeitlichen Verschiebungen die Frage offen, ob langperiodische Vorgänge von etwa 5—10 Jahren, zu denen die großen Anomalien offensichtlich gerechnet werden müssen, durch die Korrelationsanalyse von Beobachtungsreihen mit einer Gesamtlänge von etwa 30 Jahren ausreichend erfaßt wurden, oder ob die Ergebnisse im wesentlichen kurzperiodischen Erscheinungen im Periodenbereich von etwa 1—3 Jahren widerspiegeln. Diese Frage stellt sich insbesondere bei Betrachtung der Niederschlagsspektren verschiedener Äquatorialstationen, die mit typisch „rotem“ Spektrumcharakter auf den dominierenden Einfluß niedrigfrequenter Erscheinungen hinweisen (DOBERITZ, (23)).

#### 2.4. Eignung des Niederschlags als Indikator atmosphärischer Zirkulationsverhältnisse

Der Niederschlag mit seinen komplexen Entstehungsursachen ist für eine Untersuchung atmosphärischer Zirkulationsmechanismen nur bedingt geeignet. Diese Schwierigkeit wird dadurch noch erhöht, daß nur Monatssummen des Niederschlags vorliegen, die keinen Einblick in die Art des Niederschlags gestatten, z. B. ob konvektive oder Aufgleitniederschläge vorliegen. Es erscheint deshalb notwendig, eine grobe Sichtung der niederschlagserzeugenden Ursachen für das hier diskutierte Gebiet vorzunehmen. In Abb. 3 sind die verschiedenen Möglichkeiten der Niederschlagsentstehung angedeutet und abgegrenzt. Die genannten Oberbe-

griffe, wie Höhenträge der Westwindzone (der gemäßigten Breiten), stellen ebenfalls nur Andeutungen von Niederschlagsursachen dar. So können in Verbindung mit Höhenträgen konvektive und Aufgleitprozesse gemischt auftreten. Bei der Zusammenstellung in Abb. 3 kam es im wesentlichen darauf an, die geographische Verteilung und ungefähre Abgrenzung verschiedener Zirkulationsformen zu erfassen, die die normale Niederschlagsverteilung beeinflussen. Taifunbahnen wurden vernachlässigt.

Der Abgrenzung der einzelnen Gebiete dienten folgende Quellen:

- a) Innertropische Konvergenzzone (ITCZ): ALPERT (24); RIEHL (11); FLOHN (25); Local Climatological Data (13).
- b) Äquatoriale Westwindzone: FLOHN (26) und persönliche Hinweise; SADLER (27).
- c) Easterly waves nach RIEHL (11); Local Climatological Data (13).
- d) Äquatorialgrenze ektrischer Zyklonalregen nach BLÜTHGEN (28).
- e) Äquatorialgrenze des häufigen, unmittelbaren Einflusses von Höhenträgen der Westdrift: FLOHN (25) (mittlere Lage von Höhenträgen); Local Climatological Data (13).
- f) Konvergenzlinien

Der nördliche Teil des Südostpazifiks stellt leider einen „weißen Fleck“ auf dieser Karte dar, obwohl anzunehmen ist, daß Niederschläge auch hier gelegentlich auf „easterly waves“ zurückzuführen sind. Die Abgrenzung, insbesondere der äquatorialen Ausdehnung des Einflusses von Störungen der Westdrift, kann nur als grob aufgefaßt werden. So wird die über dem Südpazifik von BLÜTHGEN (28) angegebene Grenze ektrischer Zyklonalregen wahrscheinlich weiter im Norden liegen, wie die Wintermaxima des Niederschlags nicht nur von Norfolk Island und Juan Fernandez, sondern auch der Osterinsel zeigen. Die täglichen Wetterkarten aus der Zeit des IGJ 1957/58 lassen ebenfalls Fronten erkennen, die diese Grenze äquatorwärts überschreiten. Wenn eine derartige Darstellung überhaupt gebracht wird, so darf im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit der ihr zugrundeliegenden Doppelsinn nicht unberücksichtigt bleiben: Niederschlagsbeobachtungen sind nur dann als Indikator für Zirkulationsverhältnisse geeignet, wenn der Niederschlag wohlgeordneten Zirkulationsverhältnissen zugeordnet werden kann.

Wäre die Niederschlagsverteilung eines bestimmten Punktes in tropischen Gebieten (im Bereich der ITC und der Passate) zufälliger Natur, wie früher angenommen wurde, würde eine systematische Untersuchung keinerlei Verallgemeinerung erlauben. Erst die moderne Tropenmeteorologie hat den Nachweis erbracht, daß den Niederschlägen der niedrigen Breiten bestimmte atmosphärische Zirkulationsformen zugeordnet werden können. Die Arbeiten von OLASCOAGA, RAMAGE, PALMER, FLOHN und HUTTARY, RIEHL (zitiert in (11), S. 97, 98), MALKUS und RIEHL (29) sind besonders zu erwähnen. RIEHL ((11), S. 97) schreibt: „... the classical picture of random convection in the tropics must be discarded. Most rainfall occurs in consequence of organized, not unorganized, convection . . . These zones, the „secondary“ disturbances of low latitudes, act as the tropical counterpart of the cyclones of higher latitudes.“

Unter Berücksichtigung der wesentlichen niederschlagserzeugenden Zirkulationsformen wird in gewissem Maße eine Verallgemeinerung statistischer Untersuchungen und deren Interpretation im Rahmen der allgemeinen Zirkulation möglich sein.

### 3. Fragestellung

Die Frage des Auftretens der großräumigen Anomalien im äquatorialen Pazifik und deren Erklärung hängt unmittelbar mit der Frage der Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre zusammen. Die Schwankungen der klimatisch und witterungsmäßig bedeutungsvollen energetischen Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre (Wärmeaustausch, horizontaler Wärmetransport im Ozean, Verdunstung) können als relativ langsam ablaufende Prozesse aufgefaßt werden, die zu merkbaren zeitlichen Unterschieden im Ablauf witterungsmäßiger Anomalien an verschiedenen, mehr oder weniger weit auseinander liegenden Orten führen müßten. Aus der Richtung, in der solche Prozesse ablaufen, lassen sich Andeutungen über deren Ursprung und damit deren Ursachen finden.

Mit der Methode der Kohärenzanalyse bot sich ein statistisches Verfahren an, das es im Rahmen einer frequenzabhängigen Analyse gestattet, Phasendifferenzen zwischen Zeitreihen statistischen Tests zu unterwerfen und gleichzeitig die Bedeutung solcher Frequenzbereiche für die Struktur der Varianz dieser Zeitreihen abzuschätzen.

An Hand dieser Methode soll für den Bereich des äquatorialen Pazifiks geprüft werden,

- a) welche statistischen Beziehungen zwischen dem Niederschlag einerseits und dem Niederschlag und der Wassertemperatur andererseits an verschiedenen Orten vorliegen und welchen Frequenzbereichen sie angehören;
- b) ob vorhandene Phasendifferenzen statistisch signifikant sind und welche Bedeutung ihnen zukommt;
- c) auf welche Frequenzbereiche die bislang gefundenen Korrelationen mit zeitlichen Verschiebungen ansprechen;
- d) ob vorhandene Phasendifferenzen mit den bisherigen Modellvorstellungen der allgemeinen Zirkulation übereinstimmen.

### 4. Spektrum- und Kohärenzanalyse

#### 4.1. Allgemeines

Die hier beschriebene Methode der Spektrum- und Kohärenzanalyse (spectrum and cross spectrum analysis) geht auf die von WIENER (30) ausgearbeiteten Grundprinzipien der verallgemeinerten harmonischen Analyse zurück. Die rasche Verbreitung der Methoden der Spektrumanalyse, besonders auf geophysikalischem Gebiet, ist wohl TUKEY (31) zu verdanken, der es verstanden hat, diese Methode praxisreif zu machen und der erstmals den Zufallsbereich von Spektrumschätzwerten abschätzte. Daß erst rund 20 Jahre nach den grundlegenden Veröffentlichungen von WIENER diese Methoden Eingang in die Praxis gefunden haben, muß im Zusammenhang mit der technischen Entwicklung schnellrechnender Maschinen gesehen werden. Die Rechenarbeiten sind sehr umfangreich und mit konventionellen Mitteln unter heutigen Umständen nicht mehr durchführbar. Ein weiterer wichtiger Umstand, der zur raschen Anwendung dieser Methode auch in der Klimatologie führte, ist in der historischen Entwicklung der Erforschung von Zyklen, Perioden und Klimaschwankungen zu suchen. Die früheren mathematischen und statistischen Untersuchungen (funktioneller und stochastischer Zusammenhänge) auf meteorologischem und klimatologischem Gebiet basierten auf der Annahme, daß geophysikalische Zeitreihen durch eine begrenzte Anzahl von Schwingungen reproduzierbar sind und damit eine Grundlage für die prognostische Verwertbarkeit gegeben ist. Die in dieser Richtung vorgenommenen Untersuchungen und vielfach negativen Erfahrungen hat u. a. NAMIAS (32) zusammenfassend beschrie-

ben. Bei der großen Anzahl von klimatischen Zyklen oder Perioden, die im Laufe der Zeit entdeckt worden sind, mußte der Grundgedanke der Spektrumanalyse, daß sich die Zeitreihen aus einer unendlichen Anzahl von Schwingungen zusammensetzen, auf fruchtbaren Boden fallen. Ein weiterer Vorteil der Methode liegt in der frequenzabhängigen Darstellung der Varianz, die es erstmals erlaubt, einen relativ vollständigen Einblick in die Varianzstruktur von Zeitreihen zu vermitteln, und die den Bedürfnissen moderner klimatologischer Forschung entgegenkommt. Die erheblichen Vorteile, die die Kohärenzanalyse bei der Untersuchung stochastischer Zusammenhänge mehrerer Zeitreihen untereinander, z. B. gegenüber der Korrelations- und Regressionsanalyse bietet, werden weiter unten näher beschrieben.

Die in dieser Untersuchung verwendeten Gleichungssysteme gehen im wesentlichen auf TUKEY (31), (33), BLACKMANN und TUKEY (34), GOODMAN (35) et al. (35) und auf HAMON und HANNAN (36) zurück.

#### 4.2. Voraussetzungen

Die Kohärenzanalyse stellt eine frequenzabhängige Untersuchung der Kovarianz zweier Zeitreihen dar (harmonische Analyse der Kovarianz). Gegeben seien zwei Zeitreihen mit äquidistanten Werten  $x_i$  und  $y_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . Den zeitlichen Abstand der  $x_i$  (und  $y_i$ ) untereinander bezeichnen wir mit  $\Delta t$ .

Die Durchführung statistischer Berechnungen im allgemeinen und der Kohärenzanalyse im besonderen ist an gewisse Voraussetzungen gebunden, die diskutiert seien. Es wird sich dabei nicht vermeiden lassen, bereits einigen Besonderheiten der Spektrum- und Kohärenzanalyse vorzugreifen, die erst später näher erläutert werden.

a) Hauptvoraussetzung bei der Analyse von Zeitreihen ist deren Homogenität. Inhomogene Reihen täuschen einen Trend und/oder quasiperiodische Erscheinungen vor. Eine entsprechende Prüfung des Beobachtungsmaterials ist somit unumgänglich. Sofern nicht Bemerkungen über Stationsverlegungen oder Änderungen der Meßeinrichtungen eine eindeutige zeitliche Festlegung von Inhomogenitäten gestatten, sind statistische Verfahren heranzuziehen.

b) Bei der Spektrum- und Kohärenzanalyse wird von BLACKMAN und TUKEY (34) und GOODMAN et al. (35) die Elimination eines Trends durchgeführt. Die in den genannten Arbeiten durchgeführten Berechnungen beziehen sich jedoch fast ausschließlich auf Meßreihen technischer und physikalischer Art. So führt u. a. das Altern von Meßkörpern notgedrungen zu Erscheinungen innerhalb einer Meßreihe, die trendartigen Charakter haben und ohne Zweifel als systematische Meßfehler eliminiert werden müssen.

Ein Trend in Klimareihen kann durchaus ähnlicher Art sein. Man stelle sich z. B. eine anfangs freiliegende Meßwiese vor, die im Laufe von Jahrzehnten durch Baumwuchs oder Bauwerke mehr und mehr abgeschirmt wird. Die Elimination des dadurch hervorgerufenen Trends steht außer Frage. Trends treten jedoch auch in einwandfreien Beobachtungsreihen auf. Man kann einen echten Trend in Klimareihen auffassen als

- 1) eine Klimaänderung oder
- 2) eine Art Schwingung mit sehr langer Periode.

Bei den hier in Frage kommenden Reihen ist der Beobachtungszeitraum zu kurz, um den Trend als Klimaänderung zu betrachten. Oft genug bricht ein Trend plötzlich ab oder ändert sogar sein Vorzeichen. Ein unmittelbar interessierendes Beispiel sind die Niederschlagsreihen von Apia und Suva/Fiji, die

SCHOTT ((9), S. 61, 73) mit einem Trend zur beachtlichen Zunahme der Regenhöhen vom Ende des letzten Jahrhunderts bis in die zwanziger Jahre herausstellte. Ihm standen die Reihen bis 1934 bzw. 1932 zur Verfügung. Die jetzt bis 1965 vorhandene Reihe von Apia läßt diesen Trend als nur zeitweilige Erscheinung erkennen. Die Spektrumanalyse beider Reihen hat keinen nennenswerten Trendanteil erbracht (Tab. 14). Unter diesen Umständen erhebt sich die Frage, ob die schematische Übernahme der Trendelimination bei den hier durchzuführenden Rechnungen sinnvoll ist. Bei kürzeren Reihen ist oft ein bemerkenswerter Trend zu erwarten, der normalerweise nicht als systematischer Beobachtungsfehler aufzufassen ist. Man muß damit rechnen, daß bei Verlängerung der Reihen (s. Apia) ein schwingungsähnlicher Vorgang mit sehr langer Periode zum Vorschein kommt. Treten in einer solchen Reihe zusätzlich quasiperiodische Erscheinungen mit wesentlich kürzerer Wellenlänge auf, würden im Falle einer Spektrumanalyse diese und der Trend einen großen Prozentsatz der Varianz bedingen. Eliminiert man den Trend, würde das Spektrum den Eindruck entstehen lassen, daß die Varianz dieser Reihen im wesentlichen durch den quasiperiodischen Anteil kürzerer Wellenlängen hervorgerufen wird. Im Falle der Kohärenzanalyse zweier Reihen mit ähnlichem Verhalten würden damit Zusammenhänge vorgetäuscht werden, deren Kovarianzanteil in keinem Fall den wirklichen Verhältnissen entspräche.

Unterstellt man in kürzeren Reihen (etwa 30jähriger Beobachtungszeitraum), daß der eventuell vorhandene Trend im wesentlichen Bestandteil eines nicht erfaßten schwingungsartigen Vorganges mit einer Wellenlänge ist, die den Beobachtungszeitraum überschreitet, würde die Elimination des Trends einen systematischen Fehler darstellen.

c)  $\Delta t = \text{const}$  ist bei der frequenzabhängigen Analyse von Zeitreihen eine Voraussetzung, auf deren Erläuterung hier verzichtet werden kann. Bei der Analyse von klimatologischen Zeitreihen mit Monatswerten ist diese Voraussetzung allerdings wegen der unterschiedlichen Monatslänge streng genommen nicht erfüllt. Bei Verwendung von Monatsmitteln kann in erster Näherung  $\Delta t = \text{const}$  gesetzt werden, da die unterschiedliche Anzahl von Tagen in den einzelnen Monaten den Mitteln nur unterschiedliche Gewichte verleiht. Im Falle der hier verwendeten Monatssummen der Niederschlagshöhe kann  $\Delta t$  nicht mehr als konstant betrachtet werden, denn notwendigerweise wird z. B. der Monat Februar bei Gleichverteilung eine kleinere Monatshöhe des Niederschlags als die anderen Monate aufzuweisen haben, und damit bei der Spektrumanalyse eine Welle mit einjähriger Periode vortäuschen oder verstärken können. Durch die Einführung auf gleiche Monatslänge reduzierter Niederschlagswerte könnte  $\Delta t = \text{const}$  erfüllt werden. Die Differenzbeträge, die bei einer derartigen Reduktion auftreten ( $1/30 - 2/30$  der Monatssumme), liegen sicherlich innerhalb des Fehlerbereiches der Niederschlagsmeßverfahren überhaupt. Die große Veränderlichkeit der Monatssummen innerhalb eines Jahres und des gleichen Monats innerhalb des Beobachtungszeitraumes sind ebenfalls Argumente, die eine derartige Reduktion überflüssig erscheinen lassen. Bei der Analyse der Originalreihen wurde deshalb in grober Näherung  $\Delta t$  als konstant angenommen. Da die meisten Kohärenzanalysen mit Anomalie-reihen (absolute Abweichungen vom vieljährigen Monatsmittel, d. h. mit eliminiertem Jahresgang) durchgeführt wurden, wird die Frage der Einführung reduzierter Monatssummen gegenstandslos.

d) Ein stabiles und repräsentatives Spektrum, dessen Eigenschaften verallgemeinerungsfähig sind, setzt stationäre Zeitreihen voraus. Unter einer stationären

Zeitreihe verstehen wir mit TUKEY (33) eine Zeitreihe, deren Statistiken vom Parameter Zeit unabhängig sind. Das bedeutet, daß eine Zeitreihe in der Form

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

auch als  $x_2, x_3, x_4, \dots, x_{n+1}$

oder als  $x_{h+1}, x_{h+2}, x_{h+3}, \dots, x_{h+q}$

jeweils die gleichen Statistiken, wie Mittelwert, Streuung usw. liefern würde. Im Falle geophysikalischer Zeitreihen ist diese Voraussetzung bekannterweise nicht erfüllt. Sie würde bedeuten, daß die geophysikalischen Faktoren, die ein Klimaelement bestimmen, immer die gleichen wären und selbst keinen Veränderungen unterworfen wären. Die fehlende Stationarität innerhalb klimatologischer Beobachtungsreihen ist jedoch kein Hinderungsgrund zur Berechnung von Spektren. Dies schränkt allerdings die Repräsentativität ein, und das Spektrum kann nicht mehr verallgemeinert werden. Die Aussagekraft beschränkt sich notwendigerweise auf den analysierten Zeitraum.

Die unterschiedliche Stabilität der Niederschlagsspektren wurde für den Bereich des zentralen Pazifischen Ozeans von DOBERITZ (23) untersucht. Dabei konnte eine gewisse zeitliche und regionale Stationarität der Zeitreihen nachgewiesen werden. Sie zwingt allerdings dazu, Kohärenzanalysen nur auf simultane Zeitreihen anzuwenden. Die Koppelung zweier örtlich verschiedener Zeitreihen, deren Beobachtungszeiträume etwas gegeneinander verschoben sind, birgt bereits die Gefahr in sich, daß die Voraussetzung einer zeitweiligen Stationarität nicht mehr erfüllt ist.

e) Die harmonische Analyse liefert die kürzeste Schwingung mit einer Periode von  $2\Delta t$ . Kurzperiodische Erscheinungen mit einer Wellenlänge kleiner als  $2\Delta t$  können längere Wellen vortäuschen (vgl. STUMPF (37), TUKEY (33), (38)). Diese Erscheinung ist in der englischsprachigen Literatur als „aliasing“ bekannt; in der deutschen Sprache fehlt dafür ein treffender kurzer Ausdruck (vielleicht „Alias-Effekt“?). Man kann diesen Fehler dadurch vermeiden, daß

- 1)  $\Delta t$  ausreichend klein gewählt wird oder
- 2) integrierte oder gemittelte Werte verarbeitet werden (d. h. Elimination kurzperiodischer Erscheinungen).

Bei vorgegebenen Monatswerten, wie sie hier bearbeitet werden, liegt  $\Delta t$  fest und Punkt 1) entfällt; Punkt 2) ist jedoch a priori durch das Vorliegen von Monatssummen des Niederschlags oder von Monatsmitteln der Wassertemperatur erfüllt.

f) An letzter Stelle, nicht unbedingt der Bedeutung nach, steht die Frage nach dem Verteilungsgesetz. Generell werden, wie bei allen statistischen Untersuchungen, Normalverteilungen gefordert, was besonders bei der Entwicklung statistischer Testverfahren von Bedeutung ist. Für die Berechnung von Spektren ist letztlich nicht das Verteilungsgesetz der analysierten Reihen, sondern die Frage der Stabilität der Spektren, d. h. der Wiederholbarkeit der Berechnungen mit erweiterten oder anderen Daten ausschlaggebend (TUKEY (39), S. 203). Die Verteilung spielt dabei eine untergeordnete Rolle, denn Reihen mit charakteristischen anderen Verteilungen, wie z. B. Niederschlagsreihen mit einer  $\Gamma$ -Verteilung, werden auch bei Verlängerung des Beobachtungszeitraums diese Verteilung beibehalten.

Den für Normalverteilungen entwickelten statistischen Tests werden wir bei der praktischen Berechnung der Kohärenzanalysen allerdings automatisch entgegenkommen, da meist mit Anomalien und nicht mit den

Originalreihen gerechnet wurde. De facto stellt die Verwendung von Anomalien eine Transformation der Reihen dar, wie die in Abb. 4 dargestellten Beispiele für Fanning Island, Malden Island und Apia zeigen. FREEMAN und TUKEY (in (38)) haben für  $\Gamma$ -Verteilungen (insbesondere Niederschlagsreihen) eine Transformation nach

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

vorgeschlagen.

Bei Niederschlagsreihen mit nennenswerten Monatssummen und geringer Erhaltungsneigung wird dadurch anscheinend eine brauchbare Normalverteilung erzielt. Auf Reihen mit großer Erhaltungsneigung angewendet, scheint diese Transformation nicht zu dem gewünschten Erfolg zu führen, wie Malden Island zeigt. Auch die Berechnung relativer Abweichungen vom Monatsmittel ergibt keine befriedigende Lösung. Es wurde deshalb mit den absoluten Abweichungen  $\Delta x_i$  (Anomalien)

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}_i$$

gerechnet, wobei  $\bar{x}_i$  das zu dem jeweiligen  $x_i$  gehörende vieljährige Monatsmittel darstellt. Die in Abb. 4 für Malden Island wiedergegebene Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen ( $\Delta_r x_i$ ) ist gegeben durch

$$\Delta_r x_i = \frac{x_i}{\bar{x}_i}$$

### 4.3. Berechnung von Spektrum, Ko- und Quadratspektrum

Gegeben seien zwei Zeitreihen mit äquidistanten Werten  $x_i$  und  $y_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . Im hier beschriebenen Falle stellen die  $x_i$  und  $y_i$  Monatssummen der Niederschlagshöhe oder Monatsmittel der Wassertemperatur, bzw. deren Anomalien dar.

Nach Berechnung der Mittelwerte  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  ergeben sich die Autovarianz- und Kovarianzfunktionen mit den Zeitschritten  $l = 0, 1, 2, \dots, m$ , wobei  $m \leq n$ , zu

$$\left. \begin{aligned} c_x(l) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+l} - \bar{x}) \\ c_{xy}(l) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(y_{i+l} - \bar{y}) \end{aligned} \right\} [1]$$

Gleichungen [1] stellen Auto- und Kovarianzfunktionen dar. Die Normierung der Auto- und Kovarianzfunktionen ( $c_x(l)/c_x(0)$ ) ergibt die entsprechenden Auto- und (Kreuz-) Korrelationsfunktionen (Korrelationskoeffizienten mit Zeitschritten), die bei sämtlichen Koppelungen zusätzlich errechnet wurden und bei den Ergebnissen teilweise wiedergegeben werden.

Die obige Schreibweise der Varianzfunktionen setzt stationäre Zeitreihen voraus. Das würde bedeuten, daß bei den einzelnen Zeitschritten  $l$  immer

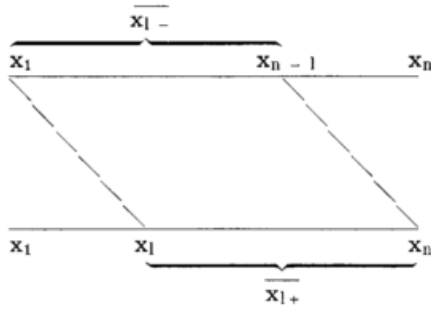
$$\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}) = 0$$

sein müßte. Bei den hier bearbeiteten Reihen, wie überhaupt bei Klimareihen, ist das nicht der Fall. Man kann diesen Fehler durch Einsetzen gleitender Mittelwerte vermeiden:

$$\left. \begin{aligned} \overline{x_{i+}} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} x_i \\ \overline{x_{i-}} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i \end{aligned} \right\} [2]$$

für  $l = 0, 1, 2, 3, \dots, m$ . [2] kommt entsprechend für  $y_{i+}$  und  $y_{i-}$  in Anwendung.

Untenstehende Schemazeichnung gibt die Bereiche wieder, für die die gleitenden Mittelwerte gebildet werden.



Die Auto- und Kovarianzfunktionen lassen sich nun in der endgültigen Form schreiben:

$$\left. \begin{aligned} c_x(l) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \overline{x_{l+}})(x_{i+1} - \overline{x_{l-}}) \\ c_y(l) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - \overline{y_{l+}})(y_{i+1} - \overline{y_{l-}}) \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

$$\left. \begin{aligned} c_{xy}(l) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \overline{x_{l+}})(y_{i+1} - \overline{y_{l-}}) \\ c_{yx}(l) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - \overline{y_{l+}})(x_{i+1} - \overline{x_{l-}}) \end{aligned} \right\} \quad [4]$$

Vorläufige Spektrumschätzwerte  $\tilde{S}(k)$  und „Kreuz“-Spektrumschätzwerte  $\tilde{C}(k)$  und  $\tilde{Q}(k)$  sind nach HAMON und HANNAN (36) gegeben durch:

$$\tilde{S}_x(k) = \frac{\delta(k)}{m} \left\{ c_x(0) + \sum_{l=1}^{m-1} \left[ c_x(l) \left( 1 + \cos \frac{\pi l}{m} \right) \cos \frac{\pi kl}{m} \right] \right\} \quad [5]$$

$$\tilde{S}_y(k) = \frac{\delta(k)}{m} \left\{ c_y(0) + \sum_{l=1}^{m-1} \left[ c_y(l) \left( 1 + \cos \frac{\pi l}{m} \right) \cos \frac{\pi kl}{m} \right] \right\} \quad [6]$$

$$\tilde{C}_{xy}(k) = \frac{\delta(k)}{m} \left\{ c_{xy}(0) + \sum_{l=1}^{m-1} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi l}{m} \right) \cos \frac{\pi kl}{m} \right] \left[ c_{xy}(l) + c_{yx}(l) \right] \right\} \quad [7]$$

für  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, m$  und

$$\tilde{Q}_{xy}(k) = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{l=1}^{m-1} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi l}{m} \right) \sin \frac{\pi kl}{m} \right] \left[ c_{xy}(l) - c_{yx}(l) \right] \right\} \quad [8]$$

für  $k = 1, 2, 3, \dots, m-1$ .  $\delta(k) = \frac{1}{2}$ , wenn  $k = 0$  oder  $m$ , sonst  $\delta(k) = 1$ .

$\tilde{C}$  stellt das vorläufige Kospektrum und  $\tilde{Q}$  das vorläufige Quadratspektrum dar.

Nach TUKEY (31) (33) werden die endgültigen Spektrumschätzwerte  $S_x, S_y, C_{xy}$  und  $Q_{xy}$  durch das folgende Glättungsverfahren erhalten:

$$\left. \begin{aligned} S_x(0) &= \frac{1}{2} [\tilde{S}_x(0) + \tilde{S}_x(1)], \\ S_x(k) &= \frac{1}{4} \tilde{S}_x(k-1) + \frac{1}{2} \tilde{S}_x(k) + \frac{1}{4} \tilde{S}_x(k+1), \text{ für } k = 1, 2, 3, \dots, m-1; \\ S_x(m) &= \frac{1}{2} [\tilde{S}_x(m-1) + \tilde{S}_x(m)], \end{aligned} \right\} \quad [9]$$

das ebenso auf  $\tilde{S}_y, \tilde{C}_{yx}$  und  $\tilde{Q}_{yx}$  angewendet wird.

Das sogenannte „Kreuzspektrum“ ist in seiner allgemeinen Form definiert als komplexe Funktion

$$S_{xy}(k) = C_{xy}(k) - iQ_{xy}(k) \quad [10]$$

$k = 0, 1, 2, \dots, m$  werden als 0, 1, 2. usw. Harmonische bezeichnet (TUKEY (32)). Die Periodenlänge der einzelnen Harmonischen erhält man zu  $\lambda = 2m \Delta t/k$ , d. h. die Hauptperiode ist  $2m \Delta t$ , was aus den Symmetriebedingungen im Falle einer  $\cos$ -Transformation erhellt. Die kleinste Periode wird  $2 \Delta t$ .

#### 4.4. Eigenschaften von Spektrum und Kospektrum

Das Spektrum  $S$  gibt für die einzelnen Harmonischen, bzw. Perioden den Anteil der Varianz wieder, der durch diese bedingt ist. Addition der Varianzanteile ergibt die „Gesamtvarianz“:

$$\sum_{k=0}^m S_x(k) = c_x(0).$$

Da die Theorie der Spektrumanalyse voraussetzt, daß jede Zeitreihe aus einer unendlichen Anzahl von

Schwingungen zusammengesetzt ist, wird verständlich, daß die vorläufigen Spektrumschätzwerte einem Glättungsverfahren mit dem Ziel unterworfen werden, eine möglichst gute Näherung an ein kontinuierliches Spektrum zu erhalten.

Im Gegensatz zu anderen Methoden der harmonischen Analyse, insbesondere der Periodogrammanalyse (Amplitudenspektrum), können daher aus dem Varianzspektrum keine Schlußfolgerungen über diskrete Periodenlängen gezogen werden. Zur Diskussion kommen nur Frequenz- oder Periodenbereiche. Dieses Verfahren hat, verglichen mit der Periodogrammanalyse, den Vorteil, daß praktisch sofort erkennbar ist, welchen Anteil bestimmte Periodenbereiche an der „Gesamtvarianz“ haben. Das Spektrum läßt somit erkennen, in welchem Periodenbereich eine weiterführende Analyse der Zeitreihe mittels anderer statistischer Methoden, z. B. Filteranalyse, lohnenswert sein kann.

Neben diesen allgemeinen Eigenschaften sei auf einige spezielle Eigenschaften hingewiesen, die zur Erläuterung verschiedener, später zur Verwendung kommender Bezeichnungen notwendig sind.

Wir sprechen in Analogie zur Optik von einem „weißen“ Spektrum (white noise = weißes Rauschen), wenn alle Harmonischen etwa den gleichen Beitrag zur Varianz liefern (Abb. 5a); es stellt das charakteristische Spektrum einer Zufallsreihe dar. Ein derartiges Spektrum ist im allgemeinen auch als flaches Spektrum anzusprechen, da es keine besonders auffälligen Spitzen zeigt. Treten in einer Zeitreihe sinusartige Schwingungen auf (z. B. Tages- und Jahresgang), so äußern sie sich je nach Anteil an der Varianz der Reihen in mehr oder weniger steilen bis spitzen Ausbuchtungen im Spektrum (Abb. 5b, Glättungsprozeß läßt kein „Linienpektrum“ entstehen). Quasiperiodische Erscheinungen werden als „Buckel“ wiedergegeben. Zeichnet sich eine Zeitreihe durch Erhaltungsneigung aus, erfolgt eine Verzerrung des gesamten Spektrums derart, daß die ersten Harmonischen (lange Perioden) allgemein einen größeren Varianzanteil als die letzten Harmonischen (kurze Perioden) aufweisen (Abb. 5c). Diese Verlagerung der Varianzanteile in den langwelligen Teil des Spektrums führte zu der Bezeichnung „rotes“ Spektrum. Bei der praktischen Analyse klimatischer Elemente treten im wesentlichen die genannten Formen als verschiedene Mischtypen auf.

Während das Spektrum einer Zeitreihe nur positive Werte annehmen kann, zeigt das Kospektrum positive und negative Werte. Das Kospektrum zweier Zeitreihen gibt wie das Spektrum den Anteil der Kovarianz für bestimmte Periodenbereiche wieder. Die Summe der Absolutbeträge der Kospektrumwerte ergänzt sich zur Kovarianz  $c_{xy}(0) = c_{yx}(0)$  der beiden gekoppelten Reihen.

Koppelung von Zufallsreihen oder Koppelung einer Zufallsreihe mit einer nicht zufällig zusammengesetzten Reihe ergibt Kospektrumschätzwerte, die im gesamten Periodenbereich null sind oder gegen null tendieren. Weisen zwei Reihen in einem bestimmten gemeinsamen Periodenbereich gleichsinnig (gegensinnig) ablaufende periodische Erscheinungen auf, zeigt sich im Kospektrum eine merkliche positive (negative) Ausbuchtung. Es treten Eigenschaften wie beim Spektrum auf, nur das Vorzeichen kann wechseln. Positive (negative) Kospektrumbereiche deuten positive (negative) Korrelation zweier Zeitreihen an. Die praktische Bedeutung des Kospektrums kann anhand eines Gedankenexperiments demonstriert werden: Wir stellen uns zwei Zeitreihen vor, deren Kospektrum etwa dem Beispiel in Abb. 5 entspricht. Die Summen der positiven und negativen Anteile des Kospektrums mögen etwa gleich groß sein. Die Summe sämtlicher Kospektrumschätzwerte geht damit gegen null und mit ihr geht die Kovarianz gegen null. Die Spektren der Einzelreihen werden offensichtlich merkbare und nicht gegen null tendierende Schätzwerte aufweisen, d. h. auch die Varianz der Einzelreihen wird nicht gegen null tendieren. Die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten wird einen Wert ergeben, der nahe null liegt und eine Korrelation von Zufallsreihen vortäuscht. Könnte man für die markanten Kospektrumbereiche gesondert Korrelationskoeffizienten berechnen, liegt die Vermutung nahe, bessere und vielleicht statistisch signifikante Korrelationskoeffizienten zu erhalten.

#### 4.5. Auflösungsvermögen und Stabilität des Spektrums, Mindestlänge der Klimareihen

Für das Auflösungsvermögen und die Stabilität des Spektrums entscheidend sind die Länge der Beobachtungsreihe und die Wahl des maximalen Zeitschritts  $m$ . Großes  $m$  liefert eine bessere Auflösung, kleines  $m$  dagegen eine größere Stabilität des Spektrums. Das Verhältnis  $m/n$  stellt somit ein Charakteristikum für die Stabilität des Spektrums dar. Bei experimentellen Reihen kann der Untersuchende auf Grund bestimmter Ar-

beitshypothesen bereits bei der Planung die entsprechende Wahl von  $m$  und  $n$  treffen. Im Falle der Verarbeitung klimatologischen Beobachtungsmaterials (vorgegebenes  $n$ ) muß ein Kompromiß zwischen dem gewünschten hohen Auflösungsvermögen und der notwendigen Stabilität des Spektrums gesucht werden.

Eine regionale Untersuchung der hier bearbeiteten Niederschlagsreihen mittels der Spektrumanalyse (DOB-ERITZ (23)) ließ erkennen, daß bei autokorrelierten Reihen (große Erhaltungsneigung) wesentlich größere Beobachtungszeiträume als bei Reihen ohne nennenswerte Autokorrelation notwendig sind. Da die Beobachtungsreihen sehr unterschiedlicher Länge sind und die Beobachtungszeiträume sich nur zeitweise überschneiden, gewinnt die Frage der zeitweiligen Stationarität an Bedeutung, die bereits in Abschnitt 4.2 näher diskutiert wurde. In der vorliegenden Arbeit liegt das Hauptinteresse im Periodenbereich  $>1$  Jahr. Die größte Periode für die man einen Spektrumschätzwert erhält, ist  $2 m \Delta t$ , für die Phase  $m \Delta t$ . In der folgenden Tabelle ist die mögliche Anzahl ( $N\lambda$ ) der Spektrumschätzwerte mit Perioden  $\geq 1$  Jahr, die durch die maximalen Zeitschritte  $m$  für vorgegebenes  $\Delta t = 1$  Monat bestimmt ist, gegenübergestellt.

$m$ (Monate)	6	12	24	48	60	90	150
$N\lambda \geq 1$ Jahr	1	2	4	8	10	15	25

Mit den verschiedenen  $m$  kann man in Abb. 6 eingehen, die den funktionellen Zusammenhang zwischen  $m$ ,  $n$ , und den für hohe Stabilität notwendigen Freiheitsgraden  $\nu$  wiedergibt (Definition von  $\nu$  in Abschnitt 4.7).

Legt man eine Mindestforderung von 10 Spektrumschätzwerten für  $\lambda \geq 1$  Jahr zugrunde und berücksichtigt die Länge der zur Verfügung stehenden Zeitreihen ( $n$  meist kleiner als 800) erhält man den in Abb. 6 schraffierten Bereich. Im günstigsten Fall sind dann Freiheitsgrade von  $\nu = 27$  zu erreichen. Auf Grund der oben erwähnten Untersuchungen kann eine Mindestforderung an Freiheitsgraden abgeschätzt werden. Sie liegt bei Reihen, die nicht durch Erhaltungsneigung beeinflusst sind bei  $\nu = 10$ , sonst bei  $\nu = 15$ . Da die Problemstellung auf die Erfassung von Vorgängen in Anomaliegebiet ausgerichtet ist, müßte bei Kohärenzanalysen zur Sicherung einer ausreichenden Stabilität der Ergebnisse eine Mindestforderung von 15 Freiheitsgraden erhoben werden. Das kreuzschraffierte Feld der Abb. 6 läßt erkennen, welchen geringen Spielraum das Beobachtungsmaterial unter den erwähnten Forderungen offen läßt. Als Mindestlänge einer Beobachtungsreihe würde man bei  $\nu = 15$  ( $n \approx 440$ ) fast 37 Jahre erhalten. Diese Mindestlänge wird von vielen Stationen nur annähernd erreicht. Bei  $\nu = 10$  erhielte man mit  $n \approx 290$  ( $\sim 24$  Jahre) einen Wert, der praktisch das absolute Minimum für die Anwendung der Kohärenzanalyse darstellt. Einige interessante Reihen, u. a. von den Galapagos-Inseln, die bislang erst 15 — 20 Beobachtungsjahre umfassen, konnten deshalb nicht in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt werden.

#### 4.6. Kohärenz und Phasendifferenz

Wie im Abschnitt 4.4 anhand des Gedankenexperiments gezeigt wurde, könnte die Möglichkeit bestehen, daß zwei Zeitreihen in bestimmten Periodenbereichen miteinander gekoppelt sind, gleich welcher Ursache dieser Koppelungsprozeß ist. Als Maß der Güte der Übereinstimmung zweier Reihen ( $x$  und  $y$ ) definiert TUKEY eine dimensionslose Maßzahl, die in Analogie zu den anderen bereits der Optik entlehnten Begriffen als Kohärenz bezeichnet wird:

$$K^2(k) = \frac{C_{xy}^2(k) + Q_{xy}^2(k)}{S_x(k) S_y(k)} \quad [11]$$

Die Kohärenz  $K^2$  ähnelt dem Korrelationsverhältnis und kann Werte zwischen 0 und +1 annehmen. Im Falle der Koppelung von Zufallsreihen geht  $K^2 \rightarrow 0$  und bei Vorliegen zweier identischer Reihen  $x_i = y_i$  wird  $K^2 = 1$ . Im Falle linearer Beziehungen der x- und y-Reihe würde  $K(k) (= \sqrt{K^2(k)})$  dem linearen Korrelationskoeffizienten für die jeweilige Periode entsprechen. Da lineare Beziehungen selten sind, insbesondere bei der Bearbeitung von Niederschlagsreihen, wird die Kohärenz im folgenden stets wie unter [11] definiert verwendet.

Die Phase  $\Theta(k)$ , definiert als

$$\Theta(k) = \arctg \frac{Q_{xy}(k)}{C_{xy}(k)} \quad [\text{in Radian}], \quad [12]$$

gibt an, um welchen Betrag die Eintrittszeit des Maximums der Schwingungen bei den Harmonischen k in den gekoppelten Zeitreihen differiert.

Die Richtung der Verschiebung wird durch die Vorzeichen des Quadratspektrums bestimmt, die Art der Schwingungen (in Phase oder Gegenphase) durch das Vorzeichen des Kospektrums. Die hier gewählte Definition in [12] gibt die Phasenverschiebung der y-Reihe relativ zur x-Reihe an.

Da bei der Auswertung der Kohärenzanalysen in dieser Arbeit unser besonderes Interesse diesen Phasendifferenzen gilt, schien es zweckmäßig, sie sofort in entsprechenden Zeiteinheiten (hier Monaten) ausgeben zu lassen:

$$\tau(k) = \frac{m \Theta(k) \Delta t}{\pi k}, \quad \left[ \text{Dim. von } \Delta t \right] \quad [13]$$

und als

$$\alpha(k) = \frac{m}{\pi k} \left[ \frac{180}{\pi} \Theta(k) \right], \quad \left[ \text{Grad} \right], \quad [14]$$

wobei bedeutet:

- |   |  |
|---|--|
| $270^\circ < \alpha \leq 360^\circ$<br>$0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ | $\left. \begin{array}{l} \text{Schwingungsvorgänge verlaufen in} \\ \text{beiden Zeitreihen mit gleichem} \\ \text{Vorzeichen.} \end{array} \right\}$            |
| $90^\circ < \alpha < 270^\circ$   | $\left. \begin{array}{l} \text{Schwingungsvorgänge verlaufen in} \\ \text{beiden Zeitreihen mit entgegen-} \\ \text{gesetztem Vorzeichen.} \end{array} \right\}$ |

Unter Berücksichtigung der Berechnung von C und Q ergeben die hier beschriebenen Rechenverfahren für  $K^2$  und  $\Theta$ , bzw.  $\tau$  und  $\alpha$  nur sinnvolle Werte für folgende Harmonische:

- a)  $K^2$  für den Bereich  $k = 1, 2, 3, \dots, m-1$  und
- b)  $\Theta$  für den Bereich  $k = 2, 3, 4, \dots, m-2$ .

#### 4.7. Zufallsbereiche und Signifikanztests

Geglättete Spektrumschätzwerte sind nach TUKEY (31) annähernd verteilt wie  $\chi^2/\nu$ .  $\nu =$  Zahl der Freiheitsgrade, definiert als

$$\nu = \frac{2n - m/2}{m} \quad [15]$$

$n =$  Kollektivumfang,  $m =$  maximaler Zeitschritt (BLACKMAN und TUCKEY (34)). Die Verteilung der Originalreihe soll einer Normalverteilung und die des Spektrums einem weißen Spektrum entsprechen.  $\chi^2$  entspricht der Definition von K. Pearson (vgl. BAUR (40)). Da das  $\chi^2$ -Kriterium als statistischer Test häufig angewendet wird, können entweder die  $\chi^2$ -Verteilung oder die Werte für  $\chi^2/\nu$  den meisten Lehr- oder Handbüchern der Statistik entnommen werden.

Als „weißes Nullkontinuum“ (WN) wird eine Gleichverteilung der Spektrumwerte zugrunde gelegt. Im hier vorliegenden Fall wurden normierte Spektrumwerte dargestellt, deren Erwartungswert bei Gleichverteilung  $100/m$  ist. Die  $2\sigma$ -, bzw.  $3\sigma$ -Grenze erhält man durch Multiplikation des Erwartungswertes mit den für gegebene  $\nu$  aus entsprechenden Tabellen entnomme-

nen  $\chi^2/\nu$ -Werte. Die  $\chi^2/\nu$ -Verteilung ist auf das Kospektrum sinngemäß anwendbar.

Bei der Kohärenzanalyse ist als Maß des Zusammenhangs zweier Zeitreihen  $K^2$  eingeführt worden. Die Diskussion, insbesondere der Phasenbeziehungen, ist in erster Linie von der Signifikanz von  $K^2$  abhängig. Die Signifikanzgrenzen für  $K^2$  sind nach GOODMAN (zitiert in PANOFSKY-BRIER (41)) gegeben durch

$$\beta = \sqrt{1 - p \frac{1}{\nu - 1}}, \quad [16]$$

mit  $p =$  Überschreitungswahrscheinlichkeit,  $\nu =$  Zahl der Freiheitsgrade. Da in der Literatur bislang ausreichende tabellarische oder graphische Darstellungen fehlen, wurde  $\beta$  für verschiedene  $p$  und  $\nu = 1, 2, 3, \dots, 100$  neu berechnet. Die Darstellung in Abb. 7 diente dem Festlegen der Signifikanzgrenzen in der vorliegenden Arbeit. Für den Fehlerbereich der Phase  $\Theta$  gilt nach GOODMAN et al. (35):

$$\text{Prob.} \left\{ \left| \hat{\Theta} - \Theta \right| < \varepsilon \right\} \approx 1 - \left\{ \frac{1 - K_\infty^2}{1 - K_\infty^2 \cos^2 \varepsilon} \right\}^{\nu/2} \quad [17]$$

wobei  $\varepsilon =$  Fehler der Phase  $\Theta$ ,  $\hat{\Theta} =$  wahre Phase,  $K_\infty^2 =$  wahre Kohärenz. Sie ist von der Kohärenz und der Zahl der Freiheitsgrade abhängig. Die Beziehung [17] setzt allerdings die Kenntnis der wahren Kohärenz  $K^2$  voraus. Den Zufallsbereich von  $K^2$  hat HAUBRICH (42), für verschiedene  $\nu$  graphisch dargestellt.

Die spätere Diskussion der Phasendifferenz in Monaten ließ es zweckmäßig erscheinen, den prozentualen Fehler zu berechnen und graphisch darzustellen (Abb. 8). Zunächst wurde die Beziehung [17] für  $\nu = 5, 10, 15, \dots, 200$  und Zehntelstufen von  $K^2$  tabelliert. Graphischen Darstellungen dieser Tabellierung wurde für  $p = 95\%$  und verschiedene  $\nu$  der  $K^2$ -Wert entnommen und in Abb. 8 eingetragen, deren Abszisse den prozentualen Fehler angibt. Auf Grund dieser graphischen Darstellung wurde der Fehlerbereich der Phase abgeschätzt. Beispiel:  $K^2 = 0.69$ ,  $\nu = 20$  ergibt  $\varepsilon = \pm 40\%$ ; bei  $\tau = 5$  Monaten erhält man einen Fehlerbereich von  $\pm 2$  Monaten, d. h. die wahre Phase liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von  $95\%$  im Bereich von 3 — 7 Monaten.

#### 4.8. Die rechnerische Behandlung des Beobachtungsmaterials

In Abschnitt 5 werden verschiedene Einzelheiten der Aufbereitung des Beobachtungsmaterials behandelt. Auf einige Besonderheiten, sowie das Blockdiagramm des Rechenablaufs sei zuvor hingewiesen.

Sämtliche Daten wurden auf Lochkarten genommen. Lücken in den Reihen sind besonders gekennzeichnet gewesen, so daß die Rechenprogramme diese erkennen konnten und nur für gültige Wertepaare Auto- und Kovarianzfunktionen berechneten. Das Blockdiagramm des Rechenablaufs ist in Abb. 9 dargestellt. Neben den Kohärenzparametern werden zusätzlich die Korrelationskoeffizienten (auch Autokorrelationskoeffizienten) ausgegeben. Die weitere Auswertung des Materials (tabellarische und zeichnerische Zusammenstellung, statistische Tests) wurde nicht maschinell durchgeführt.

### 5. Das Beobachtungsmaterial

#### 5.1. Niederschlagsbeobachtungen

Die in der vorliegenden Arbeit angewendete statistische Methode setzt lange, homogene Beobachtungsreihen voraus, die angestrebte regionale Verallgemeinerung ein ausreichend dichtes Beobachtungsnetz. Das einzige Klimaelement, das diese Voraussetzungen ausreichend zu erfüllen verspricht, ist der Niederschlag. Die

Sammlung von Beobachtungsmaterial konzentrierte sich deshalb auf Niederschlagsbeobachtungen, das anerkannterweise von zahlreichen meteorologischen Institutionen, die im Quellenverzeichnis (Tab. 3) gesondert aufgeführt sind, unterstützt wurde.

Die Beobachtungsreihen bestehen aus Monatssummen der Niederschlagshöhe, die in ganzen mm auf Lochkarten genommen wurden. Bei der Zusammenstellung der Reihen konnten häufig Werte aus mehreren Veröffentlichungen verglichen werden. Auf Unterschiede von wenigen mm wurde keine Rücksicht genommen. Sie sind offensichtlich durch Aufrunden beim Umrechnen von inch in mm und umgekehrt entstanden. In einigen Fällen ergaben sich jedoch größere Differenzen, die nicht ohne weiteres geklärt werden konnten. Eine Verwendung derartiger Reihen verbietet sich von selbst.

Tab. 3 und Abb. 10 geben einen Überblick über das zur Auswertung gekommene Beobachtungsmaterial (inklusive Wassertemperaturreihen). Die Niederschlagsbeobachtungen, auch die stark orographisch beeinflussten Niederschläge auf bergigen Inseln, wurden keinerlei Reduktionen unterworfen. Es mußte im letzten Falle allerdings darauf geachtet werden, daß keine nennenswerten Stationsverlegungen vorgekommen sind. Zu diesem Zweck wurden Koordinaten und Höhen der bearbeiteten Reihen aus der im Quellenverzeichnis genannten Literatur zusammengestellt und verglichen. Ergaben sich größere Differenzen, wurde die betreffende Station ausgeschieden, bzw. es wurde nur der längste homogene Zeitabschnitt in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, wobei gleichen Differenzen auf bergigen Inseln größeres Gewicht beigelegt wurde als auf Atollen. Die fehlenden Beobachtungen wurden in den Reihen nicht durch vieljährige Monatsmittel oder andere Schätzwerte ersetzt. Gelocht wurde dafür die Ziffer neun. Traten Monatssummen von 9 mm auf, wurden diese auf 10 mm erhöht. Das Rechenprogramm ist so aufgebaut, daß eine 9 als Lücke erkannt wird und bei der Berechnung der statistischen Parameter übergangen wird. Zur Feststellung der eventuell auftretenden Fehler bei der Bearbeitung lückenhafter Reihen wurde die lückenlose, lange Reihe von Rarotonga durch Auslösen künstlich mit Lücken versehen, wobei einmal rund 25% der Einzelmonate und ein anderes Mal rund 25% der Jahre ausgelost wurden. Mit diesen künstlichen, lückenhaften Reihen, die nur noch 75% des ursprünglichen Beobachtungsmaterials enthielten, wurden Spektren berechnet, die in Abb. 11 dargestellt sind. Verglichen mit der lückenlosen Reihe zeigt sich, daß im Periodenbereich größer ein Jahr sämtliche Spektrumschätzwerte im Zufallsbereich  $0.05 \leq p \leq 0.95$  liegen und keine nennenswerte Verzerrung des Spektrums erfolgt. Die Streuung der Monatssummen der vollständigen und der lückenhaften Reihen weist praktisch keine Differenzen auf (sie schwankt zwischen 123.3 und 123.5 mm). In den hier zur Verwendung kommenden Reihen wird eine solche große Anzahl von Lücken nie erreicht.

Im Falle roter Spektren muß damit gerechnet werden, daß die Unterschiede etwas größer werden als bei der Reihe von Rarotonga mit dem deutlichen weißen Spektrum. Leider liegen keine vollständigen langen Beobachtungsreihen aus dem Anomaliegebiet vor, mit denen dieser Test durchgeführt werden könnte. Traten bei der Koppelung von Reihen für bestimmte Zeitabschnitte einzelne Reihen mit einem Lückenanteil der genannten Größenordnung auf, wurden sie ausgeschieden und nicht mehr weiter diskutiert.

Eine weitere Möglichkeit der Beeinflussung des langwelligen Teils des Spektrums ist durch das Auftreten sehr extremer Monatssummen in Abständen von vielen Jahren gegeben. Diese extremen Werte können z. B. bei einer Periodogrammanalyse zur Vortäuschung signifikanter Perioden führen, obwohl damit zu rechnen ist, daß sie einer gewissen Zufälligkeit unterliegen. Bei der

Spektrumanalyse liefern diese Extremwerte keine bemerkenswerte Veränderung der Spektrumschätzwerte, wie z. B. anhand der Niederschlagsreihe von Apia geprüft wurde, in der sämtliche Monatssummen über 1000 mm durch den Monatsmittelwert ersetzt wurden. Auf die nähere graphische oder tabellarische Darstellung sei verzichtet.

## 5.2. Wassertemperaturreihen

Von einigen Stationen liegen Wassertemperaturreihen vor. Es sind stets an der Küste durchgeführte Beobachtungen. Sie wurden mit einer Dezimalstelle in Grad Celsius gelocht. Fehlende Monatswerte wurden durch 9.0 gekennzeichnet. Da keine Monatsmittel dieser Größe auftreten, werden Mittelwerte nicht verfälscht. Liegen die Temperaturen in Fahrenheit-Graden vor, wurden sie in Celsius-Grade umgerechnet. Wie beim Niederschlag sind die Wassertemperaturen keinerlei Reduktionen unterworfen worden.

Das Stationsverzeichnis und die zeitliche Verteilung der bearbeiteten Reihen sind in Tab. 3 und Abb. 10 wiedergegeben.

## 6. Die Ergebnisse der Kohärenzanalyse

### 6.1. Vorbemerkungen

#### 6.1.1. Übersicht über die durchgeführten Berechnungen

Mit den in Tab. 3 zusammengestellten Beobachtungsreihen wurden 150 Kohärenzanalysen durchgeführt. Von den genannten Reihen wurden neun als Basisstation verwendet, deren geographische Verteilung Abb. 12 wiedergibt. Bei der Auswahl der Basisstationen sind folgende Gesichtspunkte beachtet worden:

- möglichst lange und lückenlose Reihen zu verwenden;
- wenn a) nicht erfüllt, möglichst viele gleichzeitige Beobachtungen zu koppeln, um regionale Vergleiche durchzuführen und
- die verschiedenen Klimagebiete zu erfassen.

Das Hauptgewicht lag auf der Trockenzone und den Wechselwirkungen zwischen Wassertemperatur und Niederschlag, weshalb mit den relativ kurzen Niederschlagsreihen von Malden und Canton Island und der Wassertemperaturreihe von Puerto Chicama sämtliche anderen Stationen gekoppelt wurden. Mit anderen Reihen wurden unter Berücksichtigung der Punkte a) — c) Auswahlkollektive zusammengestellt. Tab. 4 gibt in Form einer Kreuztabelle die vorgenommenen Koppelungen wieder, wobei auf eine zeitliche Differenzierung verzichtet wurde. Obige Gesamtzahl ergibt sich aus Berechnungen für verschiedene Zeiträume. Zusätzliche Kontrollrechnungen mit künstlich lückenhaft gemachten Reihen, mit Zufallsreihen verschiedenen Kollektivumfanges usw. sind in der Gesamtzahl nicht enthalten. Die zur Auswertung gelangten Analysen beruhen überwiegend auf Anomalien, da diese die beste Annäherung an eine Normalverteilung darstellen und damit die Voraussetzungen für die Durchführung statistischer Tests optimal erfüllen.

#### 6.1.2. Die Auswertungsmethode und Darstellung der Ergebnisse

Für sämtliche Kohärenzanalysen wurden zunächst gruppenweise, d. h. nach Basisstationen geordnet, Kospektrum, Kohärenz und Phasendifferenz gezeichnet. Diese Zeichnungen wurden mit Signifikanzgrenzen bzw. -bereichen versehen und dienen der allgemeinen Beschreibung der Gruppenkohärenzen. Nachdem sich bei den ersten Analysen herausgestellt hatte, daß kurzperiodische Spektrumbereiche keine nennenswerte Bedeutung haben, wurden alle Zeichnungen, beginnend bei der längsten Periode, nur bis zur vierteljährlichen Periode angefertigt.

Durch den großen Umfang an Zahlenmaterial und Zeichnungen, dessen Veröffentlichung nicht nur den Leser, sondern auch die zeitlichen und finanziellen Möglichkeiten überfordern würde, wird man gezwungen, das Auswerteprinzip an Einzelbeispielen zu demonstrieren und gewisse statistische Maßzahlen auszuwählen, die den Hauptcharakter der Verteilungen wiedergeben. Für die Darstellung der Phasendifferenzen liegt dieses Auswahlkriterium insofern fest, als die Kohärenz angibt, in welchen Frequenzbereichen signifikante Beziehungen vorliegen. Nur diese müssen zur Darstellung gebracht werden. Einen Überblick über die Bedeutung, bzw. das Gewicht, das den einzelnen Periodenbereichen zukommt, kann nur das Kospektrum vermitteln. Selbst die Zusammenstellung von etwa 1000 Einzelwerten des Kospektrums dürfte wenig sinnvoll sein. Zur Abschätzung der Bedeutung signifikanter Periodenbereiche wird deshalb der Kovarianzanteil  $C_s$  berechnet:

$$C_s = 100 \frac{s \sum_{k=0}^s |C_{xy}(s)|}{m \sum_{k=0}^m |C_{xy}(k)|}, \quad [18]$$

$s$  = Harmonische mit signifikanten Kohärenzen. Der Nenner stellt das integrierte Kospektrum dar. Im Zähler werden die absoluten Beträge des Kospektrums sämtlicher signifikanter Periodenbereiche addiert. Der Kovarianzanteil wird in Prozent des integrierten Kospektrums ausgedrückt.

Die angewendeten Methoden der Darstellung werden in den jeweiligen Abschnitten näher erläutert.

## 6.2. Kurze Beschreibung der Niederschlagspektra

Vor Durchführung der hier vorliegenden Kohärenzanalysen wurde anhand eines Auswahlmaterials die Brauchbarkeit der Beobachtungsreihen mittels der Spektrumanalyse geprüft. Über die Ereignisse dieser Berechnungen wurde bereits berichtet (DOBERITZ (23)).

Die Neuberechnung der Spektra für das gesamte Material ergab keine Abweichungen von den bisher diskutierten Werten. In den folgenden beiden Abschnitten wird deshalb nur die regionale Verteilung der inzwischen näher spezifizierten Spektrumtypen wiedergegeben, weil sie in Bezug auf die Kospektra von Interesse ist, und auf eine Besonderheit der Spektra im westlichen Randgebiet der Trockenzone hingewiesen.

### 6.2.1. Regionale Verteilung von Spektrumtypen

Der regionale Vergleich der Spektra wird durch die Einführung von Spektrumtypen erleichtert. DOBERITZ (23) definierte drei Spektrumtypen, die sich im wesentlichen auf eine subjektive, visuelle Abschätzung der Eigenschaften der einzelnen Spektra abstützte und den Unterschied im Aufbau der Spektra des behandelten Gebietes deutlich machen sollte. Im folgenden sei eine objektive Methode entwickelt, die sich an die gefundenen Erfahrungen anlehnt und unter Einführung eines weiteren Spektrumtyps versucht, eine lückenlose Klassifikation klimatologischer Spektra für Periodenbereiche  $\geq 1$  Jahr zu ermöglichen. Als statistisch faßbarer Zufallsbereich sei der Bereich abgegrenzt, der durch das weiße Nullkontinuum und seine Zufallsgrenze von  $3\sigma$  ( $p = 99.73\%$ ) gegeben ist. Vernachlässigt wird der Periodenbereich  $< 1$  Jahr. Dominierende langperiodische Erscheinungen im Spektrum schließen nicht aus, daß der Jahresgang Spektrumschätzwerte aufweist, die die  $3\sigma$ -Grenze überschreiten. Er bietet somit keine Möglichkeit, deutlich rote Spektra von einer Art Mischtypus zu unterscheiden, in dem sich signifikante langperiodische Spektrumbereiche und der Spektrumbereich des Jahresganges die Waage halten. Es empfiehlt sich deshalb, zusätzlich Anomaliespektra zu betrachten und ein weiteres Kriterium einzuführen, das es gestattet, eine ob-

jektive Abgrenzung des roten Spektrums von anderen Spektra zu schaffen. Eine der am einfachsten zu realisierenden Möglichkeiten besteht in der Bestimmung des Spektrummedians, worunter im übertragenen Sinne die Harmonische verstanden sei, die das integrierte Spektrum halbiert. Da Spektrumanalysen mit unterschiedlicher Anzahl von Harmonischen ( $m$ ) durchgeführt werden, muß zwecks Vergleichbarkeit ein relativer Spektrummedian ( $M_r$ ) eingeführt werden, der definiert sei als der Quotient aus der Harmonischen, bei der das integrierte Spektrum halbiert wird ( $I_{50}$ ) und der Gesamtzahl der jeweilig vorliegenden Harmonischen (= maximaler Zeitschnitt):

$$M_r = \frac{I_{50}}{m}. \quad [19]$$

Dieser relative Spektrummedian ist gleich 0.50, wenn ein Zufallsspektrum vorliegt. Rote Spektra werden sich demnach durch kleine  $M_r$  auszeichnen. Die Frage der Abgrenzung eines deutlich roten Spektrums von verschiedenen roten Mischtypen kann in erster Näherung dadurch beantwortet werden, daß man ein Spektrum dann als rotes Spektrum betrachtet, wenn dessen relativer Spektrummedian unterhalb der Streuung des Zufallsspektrums liegt. Ein derartiger Spektrummedianwert sei kurz als roter Medianwert bezeichnet. Da die Streuung einer Normalverteilung  $\pm \sigma$  einen Bereich von etwa 68% der Werte des Kollektivs erfaßt, kann als Grenze zwischen einem roten und einem weißen (oder gemischten) Spektrum  $S_r$  der relative Spektrummedian angesehen werden, der bei  $0.50 - 0.34 = 0.16$  liegt. Einen entsprechenden Test wird man mit Anomaliespektra vornehmen, weil durch hohe Spektrumschätzwerte bei der Jahresperiode die Spektrumsummenkurve verzerrt wird und keine Aussage bezüglich des sonstigen Grundcharakters des Spektrums mehr zuläßt.

In Tab. 5 sind die Merkmale zur Klassifikation klimatologischer Spektra zusammengestellt. Die dort abgegrenzten Typen weisen folgende Grundzüge auf:

- Typ 0: Das Spektrum zeigt keine besonders markanten Periodenbereiche. Ein Jahresgang kann enthalten sein, ist jedoch höchstens mit der  $2\sigma$ -Grenze statistisch signifikant und trägt zur Varianz der Reihen nur wenig bei. Die Reihen zeigen praktisch Zufallscharakter und haben keine Erhaltungsneigung (Abb. 13 a, b).
- Typ 1: Das Spektrum zeigt einen sehr gut ausgeprägten Jahresgang, meist in der Form einer Art Spektrallinie (trotz Glättung!). Das Anomaliespektrum ist weiß (Abb. 13 c, d).
- Typ 2: Neben einem meist signifikanten Jahresgang treten bemerkenswerte langperiodische Erscheinungen auf, die das Anomaliespektrum in Richtung auf ein rotes Spektrum verzerren (Abb. 13 e, f).
- Typ 3: Stark verzerrte Spektra mit dominierenden langperiodischen Erscheinungen und großer Erhaltungsneigung. Der Jahresgang verliert an Bedeutung und ist unter Umständen nicht mehr statistisch signifikant (Abb. 13 g, h).

Entsprechend der Tab. 5 sind a priori deutlich rote Spektra als Typ 3 definiert, während sich die anderen Typen durch Abgrenzung bestimmter Periodenbereiche auf Grund der  $3\sigma$ -Grenze ergeben. Normalerweise wird man mit einer Abgrenzung der Spektrumtypen auf Grund der Zufallsbereiche beginnen und zum Schluß an Hand des roten Medianwertes eine Korrektur dieser „vorläufigen“ Klassifikation durchführen.

Abbildung 14 gibt die regionale Verteilung der nach Tabelle 5 bestimmten Spektrumtypen wieder. Sie unterscheidet sich von der 1967 veröffentlichten im we-

sentlichen durch eine Erweiterung der Übersicht in den Randgebieten und durch eine Ausdehnung des Spektrumtyps 3 nach Malden, Fanning Island und Atuona. Es darf nicht unbemerkt bleiben, daß die Spektrumtypen nach Reihen unterschiedlicher Länge und Beobachtungszeit bestimmt wurden und die vorgenommene Klassifizierung nur als eine vorläufige betrachtet werden kann. Für die folgenden Betrachtungen ist bemerkenswert, daß etwa zwischen 5° N und 10° S mit den Spektrumtypen 2 und 3 sich das Anomaliegebiet ähnlich wie in Abb. 1 markiert, das sich durch das Überwiegen langperiodischer Erscheinungen von dem übrigen pazifischen Gebiet abhebt. Im äquatorialen südamerikanischen Küstengebiet scheint der Jahresgang bereits wieder eine dominierende Rolle zu übernehmen, soweit das an Hand der wenigen Niederschlagsreihen vermutet werden kann. Von Interesse ist das Auftreten des Spektrumtyps 0 bei Midway Island und der Osterinsel. Da der Spektrumtyp 2 im gewissen Sinne den Typ 3 einschließt, wurde für den Ostteil des äquatorialen Pazifiks mit dem Zentrum südlich des Äquators der Typ 2 in Abb. 14 dargestellt. Eine endgültige Festlegung muß der Zukunft vorbehalten bleiben, wie auch die Abgrenzung des Spektrumtyps 3 im Bereich der Linien-Inseln (Fanning und Christmas Island) wegen der sehr lückenhaften Beobachtungsreihe von Christmas Island nicht endgültig sein kann (s. auch SCHÜTTE (2), S. 60).

### 6.2.2. Zur Frage der praktischen Bedeutung klimatologischer Spektren

Anhand zweier für die äquatoriale Trockenzone und deren Abgrenzung interessanter Beispiele sei die klimatische Bedeutung der Spektrumanalyse erläutert. Die Möglichkeiten der praktischen Verwertbarkeit sind damit in keinem Falle erschöpft.

Zunächst sei die Frage der Abgrenzung des äquatorialpazifischen Trockengebietes erwähnt, die allein aufgrund der mittleren Jahressummen des Niederschlags kaum möglich ist. Auf der Suche nach weiteren Kriterien wurden die Veränderlichkeit, unperiodische Schwankungen und sog. Krisenmonate und -jahre des Niederschlags herangezogen, über die SCHOTT (9), S. 83—90) zusammenfassend berichtete. Die großen, mehr oder weniger periodischen und unperiodischen Schwankungen des Niederschlags sind es, aufgrund derer u. a. Fanning, Ocean Island und Nauru trotz der hohen mittleren Jahressummen des Niederschlags von etwa 2000 mm zumindest zu dem Anomaliegebiet, wenn nicht sogar zu dem Trockengebiet gezählt werden (TÜLLMANN (10), SCHOTT (9)). Schwankungen dieser Art spiegeln sich in einem Spektrum besonders gut wider, indem sie im Falle des Dominierens von Schwankungen, die eine Periodenlänge von mehreren Jahren haben, zu einem roten Spektrum führen. Das Vorliegen eines roten Spektrummedians (wie in Abschnitt 6.2.1 definiert) kann unter diesem Gesichtspunkt als Kriterium für die Zugehörigkeit einer Station zum Anomaliegebiet gewählt werden. Da Spektren mit einem roten Medianwert zum Typ 3 gehören, kann im Falle höherer Jahressummen des Niederschlags, die keine eindeutige Zuordnung zur Trockenzone mehr ermöglichen, die Ausdehnung des Spektrumtyps 3 als Hilfsmittel herangezogen werden und zeigt in Abb. 14, daß die Inseln Fanning, Nauru und Ocean im Regime der Trockenzone liegen.

Eine weitere überzeugende Möglichkeit des Nachweises der Leistungsfähigkeit von Spektrumanalysen zur Untersuchung der Varianzstruktur von Zeitreihen bieten die Inseln Nauru und Ocean Island. DOBERITZ (23) hatte bereits darauf hingewiesen, daß die Spektren dieser Reihen keine nennenswerte Jahresperiode mehr aufweisen, sondern die Varianz praktisch nur durch den Periodenbereich größer ein Jahr bestimmt wird. Abb. 13

gibt das Niederschlagsspektrum von Nauru wieder und läßt den verschwindend kleinen Anteil der Jahresperiode deutlich erkennen (es handelt sich nicht um das Anomaliespektrum!). Die Interpretation dieser Erscheinung ist insofern von größtem Interesse, als sie im Widerspruch zu den vieljährigen Monatsmitteln des Niederschlags (1892—1962) zu stehen scheint, die einen Jahresgang erkennen lassen:

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
272	241	201	164	123	131	159	161	128	122	159	246

Andere Reihen mit in den Monatsmitteln ähnlich ausgeprägtem Jahresgang liefern im Spektrum bei der Jahresperiode eine markante Spitze (Abb. 13) und bestätigen deren Bedeutung. Die Niederschlagsreihe von Nauru jedoch weist in den Einzeljahren durchaus nicht immer diesen Gang auf, und der mittlere Jahresgang wird bei den Monatsmitteln nur dadurch hervorgerufen, daß einzelne sehr hohe Monatssummen des Niederschlags mit einer gewissen jahreszeitlichen Bindung auftreten und bei einer Mittelbildung den Jahresgang vortäuschen. Die in Tab. 2 wiedergegebenen Monatssummen des Niederschlags deuten diese Verhältnisse an, wie sie auch zeigen, daß in einzelnen Jahren das Niederschlagsmaximum ausbleiben kann. TÜLLMANN (10) versuchte durch Auszählung von Krisenmonaten und -jahren die Sonderstellung der Inseln im westlichen Randgebiet der Trockenzone darzustellen. Die Spektrumanalyse führt auf eine einfache und kaum deutlicher wiederzugebende Weise vor Augen, daß das Fehlen eines regelmäßigen Jahresganges des Niederschlags und damit der alljährlich für die Vegetation notwendigen Regenzeit die Hauptursache für die Krisenhaftigkeit der dortigen Klimas ist. Das Spektrum von Ocean Island zeigt die gleichen Besonderheiten und braucht nicht näher diskutiert zu werden, während Fanning Island Abb. 13 h eine deutliche Spitze bei der Jahresperiode aufweist und damit weniger krisenhaft ist. Aus diesem Grunde wurde die Grenze des Spektrumtyps 3 in Abbildung 14 dicht an Fanning Island vorbeigeführt, während bei Nauru und Ocean Island ein etwas größerer Abstand gewahrt wurde.

### 6.3. Kohärenz und Phasendifferenz zwischen langen Beobachtungsreihen

Anhand der längsten zur Verfügung stehenden Reihen aus dem Anomaliegebiet und einiger ausgewählter langer Reihen aus den Nachbargebieten werden Ergebnisse der Kohärenzanalyse diskutiert. Die ausgewählten Reihen (Abb. 15—18) geben typische Wechselwirkungen wieder. In den Abbildungen werden jeweils das normierte Kospektrum, die Kohärenz  $K^2$  mit den Signifikanzgrenzen  $2\sigma$  ( $p = 95\%$ ) und  $3\sigma$  ( $p = 99.73\%$ ) und die Phasendifferenz in Monaten mit dem Zufallsbereich für  $p = 95\%$  im Falle kohärenter Beziehungen wiedergegeben. Bei der Phasendifferenz bedeutet ein positiver (negativer) Wert, daß die Basisstation (= die jeweils zuerst genannte Station) in dem betreffenden Frequenzbereich vorläuft (nachhinkt). Positive (negative) Werte des Kospektrums geben an, daß die Beziehungen gleichsinnig (entgegengesetzt) verlaufen.

Als Beispiele wurden nur Koppelungen von Niederschlagsreihen unter sich und mit der Wassertemperaturreihe von Puerto Chicama ausgewählt. Koppelungen der Wassertemperatur unter sich wurden ebenfalls vorgenommen, sind jedoch bezüglich der Länge der Beobachtungszeiträume nicht mit den hier verwendeten Beispielen vergleichbar und werden deshalb erst in Abschnitt 6.4.3 diskutiert.

#### 6.3.1. Wechselbeziehungen zwischen Niederschlagsreihen

Die Einzelbetrachtungen von Niederschlagskohärenzen seien mit dem Beispiel der Reihen von Apia und Rarotonga (Abb. 15) begonnen. Das Kospektrum zeigt bei der

Jahresperiode eine markante Spitze, die man bei der Kohärenz wiederfindet. Der übrige Teil des Kospektrums weist keine nennenswerte Kovarianz auf, wenn man davon absieht, daß das Anomaliekospektrum im Periodenbereich über ein Jahr stärker vom Kospektrum der Originalreihe abweicht. Die Darstellung der Kohärenz läßt jedoch für die Anomalien keinen signifikanten Periodenbereich erkennen, selbst im langperiodischen Bereich sind die Beträge von  $K^2$  gleich, obwohl die Anomalien größere Kospektrumwerte zeigen. Als einziger signifikanter Periodenbereich stellt sich die Jahresperiode heraus. Faßt man sämtliche Kospektrumordinaten zusammen, zu denen eine signifikante Kohärenz gehört, so wird durch einen Periodenbereich von etwa 9—15 Monaten 76% der Kovarianz dieser Reihen bedingt. Selbst eine Beschränkung auf die Jahresperiode und deren Nachbarwerte (Harmonische 9—11) ergibt einen Kovarianzanteil von 65%.

Die überwiegend positiven Werte des Kospektrums lassen auf positive Koppelung der beiden Reihen schließen. Der Korrelationskoeffizient der Monatswerte ohne zeitliche Verschiebung ist bei der Originalreihe +0.36 und bei den Anomalien +0.08 ( $N = 763$ ). Der signifikante Korrelationskoeffizient der Originalreihe ist auf die Kohärenz im Bereich der Jahresperiode zurückzuführen.

Wendet man sich den Phasendifferenzen zu, findet man im langperiodischen Bereich relativ große Werte, die für Original- und Anomalierihen einheitlich sind. Das Fehlen signifikanter Kohärenzen in diesem Bereich zeigt, daß diese Phasendifferenzen, so einheitlich sie sein mögen, zufälliger Natur sind. Die Einheitlichkeit könnte höchstens als ein Zeichen für die Güte der Elimination des Jahresganges aufgefaßt werden, was im kurzperiodischen Bereich der Phasendifferenzen und Kohärenz seine Bestätigung findet. Der Frequenzbereich um ein Jahr ergibt Phasendifferenzen von +0.5 Monaten, d. h. die Jahreswelle von Apia läuft der von Rarotonga im Mittel einen halben Monat voraus. Diese kleine Differenz ist anhand der vieljährigen Monatsmittel kaum demonstrierbar; anhand des nächsten Beispiels wird der Unterschied im Jahresgang besser erkennbar sein.

Zusammenfassend zeigt die Kohärenzanalyse des Niederschlags von Apia und Rarotonga neben dem Jahresgang keine signifikanten Beziehungen zwischen den beiden Reihen. Die Jahreswelle weist eine Phasendifferenz von +0.5 Monaten auf. Der signifikante Periodenbereich von 9—15 Monaten bedingt 76% der Kovarianz der Monatswerte.

Bei der Koppelung von zwei Stationen, die dem Anomaliegebiet angehören, nämlich dem Niederschlag von Fanning und Nauru (Abb. 16), erhält man ein wesentlich anderes Bild. Betrachtet man zunächst Abb. 16a, in der die Koppelung der Originalreihen dargestellt ist, so zeigt das Kospektrum bei überwiegend positiven Werten einen roten Spektrumcharakter: Das Kospektrum liefert für den Periodenbereich über ein Jahr den Hauptanteil der Kovarianz, während die Jahreswelle fast verschwindet.  $K^2$  weist jedoch nicht nur im Bereich größer als 1 Jahr, sondern auch beim Jahresgang signifikante Werte auf. Selbst bei 5—6 Monaten treten noch einige signifikante Kohärenzen auf. Die Bedeutung dieser signifikanten Kohärenzbereiche ist aufgrund des Kospektrums qualitativ rasch abgeschätzt, denn die Periodenbereiche von 1 Jahr und von 5—6 Monaten liefern keinen bedeutenden Beitrag. Im Einzelnen ergeben sich folgende Kovarianzanteile:

Harmonische 3—7 (Period.-Ber. 24 —75 Mon.) = 56%  
 Harmonische 14—16 (Period.-Ber. 10.5—13.3 Mon.) = 7%  
 Harmonische 31—32 (Period.-Ber. 5.5—6 Mon.) = 1%

Verglichen mit dem Kospektrum von R Apia — R Rarotonga, in dem der Jahresgang den größten Teil der Kovarianz ergab, wird der Unterschied sehr deutlich.

Das Auflösungsvermögen der Spektra scheint dabei von untergeordneter Bedeutung zu sein wie das Anomaliespektrum in Abb. 16 zeigt, dessen Kovarianzanteil im langwelligen Bereich (Harmonische 2—5, Periodenbereich etwa 22—90 Monate) 54% liefert und damit dicht bei dem der Originalreihe liegt. Hier wurde, im Gegensatz zu Tab. 7, Absch. 6.4 ff., die signifikante 1. Harmonische nicht mitgezählt, weil dafür keine Phasendifferenz errechnet werden kann und dadurch der Aussagewert eingeschränkt ist. Das Anomaliekospektrum spricht für sich. Die signifikanten Periodenbereiche im niederfrequenten Bereich gleichen sich in Abb. 16a und b. Der einheitlich hohe Kovarianzanteil im Periodenbereich über ein Jahr läßt erwarten, daß die Korrelationskoeffizienten der Originalreihe und der Anomalien sich nicht wesentlich unterscheiden und signifikant sind, d. h. anders als bei der Koppelung von Apia und Rarotonga verhalten: Korrelationskoeffizient Originalreihe = 0.34 ( $n = 552$ ), Korrelationskoeffizient Anomalierihe = 0.39 ( $n = 567$ ). Berücksichtigt man die Phasendifferenz zwischen der Originalreihe von Nauru und den 3 Monate darauf folgenden Wert der Fanning-Reihe, erhält man einen Wert von 0.44 ( $n = 552$ ).

Die Betrachtung der Phasendifferenzen möge bei der Jahresperiode begonnen werden, die hier eine Differenz von -2.6 Monaten aufweist, d. h. bei Fanning ist im Mittel das Jahresmaximum des Niederschlags etwa 2.6 Monate später als bei Nauru zu erwarten. Die Gegenüberstellung der vieljährigen Monatsmittel (mm) für den Zeitraum 1903—62 bestätigt das:

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni
R Fanning Isl.	210	227	233	<b>320</b>	308	270
R. Nauru	<b>297</b>	245	217	176	120	129
	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez
	186	110	74	78	81	160
	160	167	131	132	156	253

Außer Frage steht bei diesem Vergleich, daß die visuell abgeschätzte Phasendifferenz nicht die Güte der errechneten haben kann.

Von wesentlich größerem Interesse sind die Phasendifferenzen im langwelligen Bereich. Mit einer Ausnahme sind sie negativ und weisen Beträge auf, die zwischen 0 und 2 Monaten schwanken (im signifikanten Bereich von  $K^2$ ). Das Gebiet mit den größten Kohärenzen (Periodenbereich von 2—3 Jahren) zeigt einheitlich ein Vorlaufen von Nauru um etwa 1.5 Monate. Mit abnehmenden Frequenzen werden die Beträge kleiner und sind bei 60 Monaten im Vorzeichen unterschiedlich, im Betrag jedoch kleiner 1 Monat. Die größere positive Phasendifferenz in Abb. 16a bei der 2. Harmonischen ist nicht mehr signifikant. Das Mittel der Phasendifferenzen im kohärenten Bereich ergibt sich für die Originalreihe zu -0.8 und für die Anomalierihe zu -1.2 Monaten.

Die Bedeutung dieser Phasendifferenzen ist vom Standpunkt der allgemeinen Zirkulation sehr interessant, wie später gezeigt wird. Ihre praktische Bedeutung darf jedoch nicht überschätzt werden. Die mittlere Periode des diskutierten Signifikanzbereiches liegt bei etwa 50 Monaten; das bedeutet bei einem mittleren Vorlaufen von Nauru um einen Monat eine relative Differenz von nur 2%. Das vergleichbare relative Vorlaufen beim Jahresgang beträgt 22%. Für den Fall der prognostischen Verwertbarkeit der statistischen Beziehungen zwischen den Niederschlagsanomalien von Fanning und Nauru läßt sich somit keine praktisch verwertbare zeitliche Verschiebung angeben.

Zusammenfassend gesagt, zeigt die Kohärenzanalyse von R Fanning und R Nauru, besonders im Periodenbereich von etwa 2—5 Jahren, statistisch signifikante Beziehungen, die über 50% der Kovarianz dieser Reihen bedingen, während der Jahresgang nur einen kleinen Teil zur Kovarianz beiträgt. Der niedrigfrequente Bereich weist eine mittlere Phasendifferenz von —1 Monat auf; die langperiodischen Schwankungen verlaufen in den beiden Richtungen gleichsinnig.

Nachdem die Kohärenzanalysen zweier Stationen des regenreichen Gebietes südlich 10° S und zweier Stationen der Anomaliezone diskutiert wurden, sei eine Koppelung zwischen diesen beiden Gebieten anhand der Niederschlagsreihen von Fanning Island und Apia (Abb. 17) als drittes typisches Beispiel erwähnt. Die Auswahl dieser beiden Stationen hat insofern einen besonderen Grund, als SCHOTT (9), S. 89/90 anhand dieser und anderer Stationen eine Gegenläufigkeit der Niederschlagsanomalien im Trockengebiet und im regenreichen Westteil des SE-Passat-Gebietes, demonstrierte, wie sie u. a. auch Abb. 1 zeigt.

In Abb. 17 wurde auf die Darstellung der Originalreihe verzichtet, die für die gutausgeprägten Jahresgänge in beiden Reihen zu einem Kovarianzanteil von 46% führt und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Eintrittszeit des Niederschlagsmaximums (3 Monate) einen Korrelationskoeffizienten von —0.37 ergibt, während der Korrelationskoeffizient ohne zeitliche Verschiebung —0.08 ist (n = 656, bzw. 659). Die Koppelung der Anomalien weist einen Korrelationskoeffizienten von —0.18 (n = 674) auf, der unter Berücksichtigung einer zeitlichen Verschiebung von 2 Monaten (s. unten) —0.23 (n = 674) wird.

Diese generell negativen Korrelationen werden durch das negative Kospektrum im langperiodischen Bereich bestätigt. Die Kohärenz weist diese Beziehungen bei Perioden >3 Jahre als signifikant aus, wenn auch nur aufgrund der 2  $\sigma$ -Grenze. Für die 2. und 3. Harmonische (Periodenbereich 3—7 Jahre) ergibt sich ein Kovarianzanteil von 25%. Die Phasendifferenz von etwa +2.5 Monaten für diesen Periodenbereich erklärt die genannten unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten.

Wenn für das Stationspaar Fanning — Apia die von SCHOTT (9) aufgezeigten Beziehungen mit der 2  $\sigma$ -Grenze als statistisch signifikant und für einen längeren Zeitraum gültig betrachtet werden können, so bedarf angesichts der statistisch nicht sehr gut gesicherten Beziehungen eine gebietsmäßige Verallgemeinerung einer weiteren Nachprüfung. Die Stationsauswahl in Tab. 6 gibt die Kohärenzen im Periodenbereich  $\geq 8$  Monate wieder. Während Papeete und Rarotonga nur bei der Jahresperiode mit Fanning kohärent sind, deutet das am weitesten von der Basisstation entfernte Norfolk im gleichen Periodenbereich wie Apia (>3 Jahren) mit 2  $\sigma$  signifikante und gegensinnig verlaufende Wechselwirkungen an. Die für das Gebiet nördlich 10° N (NE-Passat-Gebiet) ausgewählten Stationen Guam und Midway Island zeigen mit Ausnahme von Guam bei der Jahresperiode keine signifikanten Beziehungen. Bei Midway Island liegt selbst die Jahresperiode im Zufallsbereich (s. Abschnitt 6.2.1).

Bezüglich der auffälligen Kohärenz mit Norfolk Island sei auf Abschnitt 6.4 und Tab. 7 verwiesen, in denen sich zeigt, daß auch Malden Island, jedoch nicht Canton Island, signifikante langperiodische Bereiche aufweist. Die Koppelungen des Niederschlags von Fanning Island mit R Apia und den in Tab. 6 zusammengestellten Stationen ergeben allerdings sämtlich im langwelligen Bereich ein negatives Kospektrum, was mit der in Abb. 1 erkennbaren Gegenläufigkeit übereinstimmt. Eine generelle, gebietsmäßige, signifikante Wechselwirkung im Sinne von SCHOTT ist nicht nachweisbar, was deren

Verifizierung in speziellen Fällen nicht ausschließt. In Abschnitt 6.4.2 werden dazu noch einige Bemerkungen zu machen sein.

### 6.3.2. Wechselwirkungen zwischen Wassertemperatur und Niederschlag

Die bislang gefundenen hohen positiven Korrelationen zwischen der Wassertemperatur im Küstenbereich Perus und dem Niederschlag der äquatorialen Pazifikinseln (SCHÜTTE (2)) macht eine Kohärenzanalyse besonders interessant. Als zwei typische Beispiele sind in Abb. 18 die Anomaliekohärenzen zwischen der Wassertemperatur in Puerto Chicama und dem Niederschlag auf Nauru und Fanning Island zusammengestellt. Beide Stationskoppelungen zeigen einheitlich hohe und positive Kospektrumsbereiche bei Perioden >1 Jahr und demonstrieren damit ihren roten Kospektrumcharakter. Bei Perioden >3 Jahre sind kohärente Wechselwirkungen mit mindestens 2  $\sigma$ , meist 3  $\sigma$ , signifikant. Die durch diese Bereiche bedingte, vergleichbare Kovarianz beträgt bei der Koppelung mit Fanning Island 30% und mit Nauru 34% (jeweils 2. und 3. Harmonische), im gesamten signifikanten Kohärenzbereich von Nauru (Harmonische 2—4) 42%. Die hohen Kovarianzanteile kommen auch in den Korrelationskoeffizienten der Monatsanomalien zum Ausdruck:

$$\begin{aligned} \text{Kkf } \Delta T_w \text{ Puerto Chicama} - \Delta R \text{ Fanning Island} &= 0.44 \quad (n = 438), \\ \text{Kkf } \Delta T_w \text{ Puerto Chicama} - \Delta R \text{ Nauru} &= 0.44 \quad (n = 403). \end{aligned}$$

Im kurzperiodischen Bereich (<1 Jahr) fällt bei Fanning Island der signifikante Periodenbereich um 10 Monate auf. Diese Eigentümlichkeit wird später diskutiert werden, da sie auch bei Koppelungen anderer Stationen auffiel (Abschnitt 6.5.2). Ihr Kovarianzanteil ist jedoch mit 7% relativ gering.

Die Phasendifferenzen der beiden Koppelungen sind zwar recht unterschiedlich, im absoluten Betrag jedoch klein (sie schwanken um einen Monat) und ergeben im günstigsten Fall eine relative Phasendifferenz von etwa (1/40 Monate)  $\times 100 = 2.5\%$  und ähneln somit größenordnungsmäßig den bereits bei der Kohärenzanalyse von R Fanning Island und R Nauru gefundenen Differenzen. Trotzdem sind die Vorzeichen bei Nauru insofern interessant, als sie im langwelligen Bereich ein einheitliches Vorlaufen der Wassertemperaturanomalien gegenüber dem Niederschlag ergeben, während bei Fanning Island das Vorzeichen wechselt und für den signifikanten langwelligen Bereich kein einheitliches Verhalten der Phasendifferenz vorhanden ist. Der Periodenbereich um 10 Monate ergibt bei Fanning Island ein leichtes Vorlaufen des Niederschlags gegenüber der Wassertemperatur.

Insgesamt bestätigen die Kohärenzanalysen die starke gleichsinnige Koppelung zwischen den Wassertemperatur- und Niederschlagsanomalien über sehr große Entfernungen im äquatorialen pazifischen Bereich, die insbesondere durch quasiperiodische Vorgänge im Periodenbereich >3 Jahre hervorgerufen werden.

## 6.4. Regionale Ausdehnung kohärenter Wechselwirkungen

### 6.4.1. Vorbemerkungen

Die in Abschnitt 6.3 an einigen Musterbeispielen diskutierte Kohärenzanalyse wurde systematisch auf das vorliegende Beobachtungsmaterial ausgedehnt. Die ersten Koppelungen ließen rasch erkennen, daß es wenig sinnvoll ist, jede Station mit jeder zu koppeln. Der rechnerische Aufwand hätte in keinem Verhältnis zu den Ergebnissen gestanden. Die Verwendung gewisser Basisstationen, wie die Auswahl von Sekundärstationen für bestimmte Koppelungen lag nahe.

Dem Ziel der Untersuchung entsprechend, wurden als Basisstationen zunächst die im Zentralteil der Trockenzone liegenden Inseln Malden und Canton Island gewählt, mit denen sämtliche verfügbare Stationen gekoppelt wurden. Die Ergebnisse dieser relativ kurzen und besonders im Fall Malden Island auch lückenhaften Reihen mußten durch die Wahl „benachbarter“ längerer Reihen geprüft und ergänzt werden. Als Nachbarstationen kamen Fanning Island, Nauru und Apia in Frage. Die zusätzliche Verwendung von Guayaquil als Basisstation geht auf die Untersuchungen von SCHÜTTE (2) zurück, die Verwendung der Osterinsel auf die Frage nach den Wechselwirkungen zwischen der Intensität des südostpazifischen Hochs, der Stärke des Passats und der Trockenheit der Äquatorzone.

Mit Ausnahme von Canton und Malden Island wurden die Basisstationen nur mit einer Stationsauswahl gekoppelt, wobei der Durchführung der relativ aufwendigen Berechnungen entgegenkommt, daß sich bei gegenseitigem Vertauschen von Basis- und Sekundärstation am Ergebnis der Kohärenzanalyse mit Ausnahme des Vorzeichens der Phasendifferenz nichts ändert. Die verschiedenen Koppelungen ergänzen sich gegenseitig. Wenn man zu den einzelnen Basisstationen, die nur mit einer Auswahl gekoppelt wurden, außerdem sich überschneidende Auswahlkollektive bildet, kann man das mit Beobachtungsmaterial überdeckte Gebiet relativ lückenlos erfassen.

Bei der Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Niederschlag und Wassertemperatur wurden mit der  $T_w$ -Reihe von Puerto Chicama möglichst viele Stationen gekoppelt, während mit  $T_w$  La Libertad (Reihe wahrscheinlich wenig repräsentativ) nur ein Auswahlkollektiv analysiert wurde.

In Tab. 7 sind sämtliche mit Anomalien und maximalem Zeitschritt  $m = 60$  gerechneten Kohärenzanalysen zusammengestellt worden. Die Tabelle ist so angelegt, daß zur besseren Übersicht die Basisstation nur am Anfang jeder Gruppe von Kohärenzen genannt wird. Ebenso wurde mit dem Beobachtungszeitraum verfahren, der allerdings häufiger wechselt. Tabelliert sind die Kohärenz  $K^2$  in Hundertsteln und der Kovarianzanteil  $C_s$ , der durch den mit  $2\sigma$  signifikanten Periodenbereich bedingt ist. Die Kohärenzanalysen wurden fortlaufend numeriert. Ein Hinweis wie Tab. 7/18 bedeutet, daß die 18. Kohärenzanalyse in Tabelle 7 gemeint ist. Die  $2\sigma$ -Grenze ( $p = 95\%$ ) überschreitende Kohärenzen sind einfach, die  $3\sigma$ -Grenze ( $p = 99.73\%$ ) überschreitende doppelt unterstrichen.

Tab. 8 gibt eine Anzahl von Kohärenzen wieder, denen Koppelungen der Originalreihen zugrunde liegen. Anordnung und besondere Kennzeichnung entsprechen der Tab. 7.

#### 6.4.2. Kohärente Beziehungen zwischen Niederschlagsreihen

Der Hauptteil der durchgeführten Berechnungen bezieht sich auf Niederschlagsreihen. Tab. 7/1—77 gibt nach verschiedenen Basisstationen und Zeiträumen geordnet die mit Anomalierreihen errechneten Kohärenzen  $K^2$  wieder. Für einige Stationen wurden zusätzliche Analysen mit den Originalreihen durchgeführt, die in Tab. 8/1—20 zusammengestellt wurden. Die Wechselwirkungen seien in der Reihenfolge diskutiert, in der sie in den Tabellen erscheinen.

Die Niederschlagsreihe von Apia wurde in Abschnitt 6.3 bezüglich ihrer Wechselwirkungen mit Fanning Island bereits diskutiert (s. auch Abb. 17). Tab. 7/1—8 läßt außerdem mit Nauru Zusammenhänge erkennen. Selbst die Inseln der zentralen Trockenzone (Malden und Canton Island) ergeben keine signifikanten Kohärenzen. Dieses Ergebnis ist insofern bemerkenswert, als auf-

grund der Zusammenhänge zwischen den langen Reihen Apia, Nauru und Fanning Island die Möglichkeit einer Verallgemeinerung der gefundenen Phasenbeziehungen auch für den zentralen Teil der Trockenzone besteht. Das Fehlen signifikanter Wechselwirkungen mit Canton und Malden Island mahnt in diesem Falle zur Vorsicht.

Den größten Teil der Kovarianz (meist über 60%) findet man im Bereich der Jahresperiode, wie verschiedene Koppelungen mit Stationen von den Gesellschaftsinseln bis zu den Neuen Hebriden zeigen (Tab. 8/1—5). Im Periodenbereich über ein Jahr deuten sich keinerlei Wechselwirkungen an.

Unter diesen Umständen müssen die statistischen Beziehungen zwischen den Niederschlagsanomalien von Apia, Nauru und Fanning Island als eine Besonderheit des Randgebietes der äquatorialen Trockenzone gewertet werden. Eine statistische Sicherung und Verallgemeinerung der von SCHOTT (9) erwähnten Niederschlagschaukel zwischen dem Anomaliegebiet und dem regenreichen Südseegebiet ist aufgrund der Kohärenzanalysen nicht möglich.

Mit interessanteren Ergebnissen wartet die Basisstation Fanning Island auf (Tab. 7/9—16, Tab. 8/6—11), die mit sämtlichen Stationen der Trockenzone signifikante Kohärenzen hauptsächlich im Periodenbereich  $\geq 2$  Jahre liefert. Die kohärenten Perioden erfassen einen Kovarianzanteil von über 50%. Im Falle der Wechselwirkungen zwischen Fanning Island, Nauru und Ocean Island erhält man einen Kovarianzanteil, der  $\frac{2}{3}$  der gesamten Kovarianz ausmacht. Diese Werte erreichen fast die der Jahresperiode im regenreichen Südseegebiet bei Koppelungen mit Apia (Tab. 8/2—4) und unterstreichen die Ausnahmestellung der äquatorialen Inseln. Die untergeordnete Bedeutung des Jahresganges wurde bereits in Abschnitt 6.3 erläutert. Stationen mit einem gut ausgeprägten Jahresgang ergeben entsprechend signifikante Kohärenzen (Tab. 8/6—10). Die Kovarianzanteile unterliegen allerdings regional starken Änderungen und sind nicht mit den bei Apia (Tab. 8/1—5) gefundenen Werten vergleichbar. Die Hauptursache dürfte in dem roten Spektrum von Fanning Island zu suchen sein. Von Interesse ist das Auftreten eines signifikanten langwelligen Periodenbereichs bei der Koppelung mit Norfolk Island (Tab. 8/6), der sich auch bei der Kohärenzanalyse von Malden und Norfolk Island (Tab. 7/20) zeigt, dessen Kovarianzanteil jedoch unbedeutend ist. Ähnliche Beziehungen mit anderen, größenordnungsmäßig in gleicher Entfernung liegenden Stationen sind nicht angedeutet, wie die Kohärenzanalysen mit der Osterinsel, Guam und Midway-Inland zeigen. Mit Midway Island sind auch im Bereich der Jahresperiode keine signifikanten Kohärenzen zu errechnen, was den Zufallscharakter des Niederschlagsspektrums von Midway Island erhärtet. Eine weitere Einbeziehung dieser Stationen in die Berechnungen schien deshalb nicht gerechtfertigt.

Malden Island (Tab. 7/17—29) zeigt als Basisstation mit Nauru, Ocean und Fanning Island die zu erwartenden signifikanten Beziehungen im Periodenbereich  $\geq 30$  Monate. Die Verteilung der kohärenten Periodenbereiche ist allerdings nicht einheitlich und bei Fanning Island fällt auf, daß nur die  $2\sigma$ -Grenze überschritten wird. Die lückenhaften Reihen mögen die Ursache für eine gewisse zeitliche Instabilität der Spektra und Kospektra sein, die sich u. a. in der Kohärenz mit Nauru äußert, das mit dem Zeitraum 1890—1925 (Tab. 7/19) und 1900—25 (Tab. 7/24) in die Berechnung aufgenommen wurde. Die dabei auftretenden Änderungen im Kovarianzanteil sind auf die unterschiedliche Anzahl signifikanter Harmonischer zurückzuführen. Im allgemeinen bewegt sich der Kovarianzanteil im Anomaliegebiet größenordnungsmäßig in demselben Bereich wie bei den Koppelungen zwischen Fanning, Nauru und Ocean Island.

Bemerkenswert ist einerseits das Fehlen signifikanter Kohärenzen mit Apia, worauf oben bereits hingewiesen wurde, und andererseits das Auftreten einzelner signifikanter langweiliger Periodenbereiche bei Norfolk, Rarotonga und Yap. Wie der Kovarianzanteil zeigt, kommt diesen Wechselwirkungen mit Ausnahme von Yap keine besondere Bedeutung zu. Sie könnten aber eine Erklärung für die u. a. auch von Walker gefundenen großräumigen Korrelationen sein, die sich z. T. auf den gleichen Zeitraum beziehen, und lassen den Gedanken einer zeitweiligen Gültigkeit der SCHOTT'schen Niederschlagsschaukel nicht ganz von der Hand weisen, denn Norfolk und Rarotonga weisen in diesem Periodenbereich negative Kovarianz auf. Bezüglich Yap fällt auf, daß im Zeitraum 1937/65 Canton Island mit Koror bei der 1. Harmonischen eine signifikante Kohärenz liefert (Tab 7/42). Yap konnte wegen der unvollständigen Reihe nicht mit Canton Island gekoppelt werden. Ebenso ist die Reihe von Koror lückenhaft.

Ein Vergleich mit den Kohärenzanalysen von Canton Island (Tab. 7/34—60), die mit wesentlich umfangreichem Beobachtungsmaterial durchgeführt wurden, bestätigt die enge Koppelung der Niederschlagsreihen im Anomaliegebiet. Der signifikante Periodenbereich ist von größter Einheitlichkeit und sein Schwerpunkt mehr in den Bereich längerer Wellen gerückt. Die Einheitlichkeit ist wahrscheinlich auf weniger lückenhaftes Beobachtungsmaterial zurückzuführen. Eine der lückenhaftesten Reihen, Christmas Island, paßt sich am wenigsten in das System ein, worauf bereits SCHÜTTE (2) hinwies; Nauru ist, vergleicht man den signifikanten Bereich und den Kovarianzanteil mit Ocean Island, ebenfalls etwas zurückgefallen (fehlende Kriegsjahre). Erhöht man den Kovarianzanteil Naurus um die 3. Harmonische, die knapp unter der 2- $\sigma$ -Grenze liegt, würde es sich in den bislang gefundenen Rahmen gut eingliedern ( $C_n = 67\%$ ). Das Einsetzen signifikanter Periodenbereiche bei etwas niedrigeren Harmonischen im Zeitraum 1937—63 ist auffällig. Bereits die Spektrum- und Filteranalyse der Niederschlagsreihen im Anomaliegebiet zeigte einen Rückgang des Varianzanteils im Periodenbereich von 24—30 Monaten für den Zeitraum nach 1930 (DOBERITZ (23)).

Deutlicher als bei den anderen Basisstationen ist die Beschränkung der signifikanten Wechselwirkungen auf das Anomaliegebiet zu erkennen. Von 27 Sekundärstationen liefern nur 5 einen beachtlichen Kovarianzanteil, der mit zunehmender Annäherung der Sekundärstationen an die Nord- und Südgrenze des Anomaliegebietes kleiner wird. Die größten Werte liefern die Koppelungen mit Ocean Island und Nauru (unter Berücksichtigung der 3. Harmonischen). Die Kohärenzanalysen mit den Basisstationen Malden und Canton Island werden bei den Phasendifferenzen noch näher diskutiert.

Wir wenden uns den Basisstationen Guayaquil (Tab. 7/61—70, Tab. 8/15—20) und Osterinsel (Tab 7/71 bis 77) zu. Sie liefern praktisch keine signifikanten Kohärenzen im Periodenbereich über ein Jahr. Das inzwischen diskutierte Verhalten des Zufallsspektrums von Midway Island läßt sich auf die Osterinsel ausweiten. Obwohl bei der Planung der Berechnungen vermutet wurde, daß die Niederschlagsreihe der Osterinsel keine bewerkenswerten Beziehungen liefern würde, mußten diese Analysen wegen der Bedeutung des Luftdrucks in diesem Teil des Pazifiks für die Intensität des SE-Passats der Vollständigkeit halber durchgeführt werden. Die monatlichen Niederschlagsanomalien lassen keine Fernwirkungen erkennen. Vielleicht ist die monatliche Niederschlagshäufigkeit ein besserer Indikator für die allgemeine Zirkulation. Für die Osterinsel liegen diese Zahlen vor, fehlen aber für die anderen Stationen.

Die Kohärenzanalyse mit Guayaquil interessieren vor allem wegen der Untersuchung von SCHÜTTE (2), die bei der Korrelation mit zentralpazifischen Inseln signifikante Korrelationen erhielt. Die Anomaliekohärenzen (Tab. 7/61—70) sind nicht signifikant und lassen vermuten, daß signifikante Korrelationen durch die Jahresperiode hervorgerufen werden. Die entsprechenden Daten (Tab. 8/15—20) bestätigen das und sind mit den von SCHÜTTE ((2), Tab. 6) errechneten Werte gut vereinbar. Bemerkenswert sind im Bereich der Jahresperiode fehlende oder nur mit der 2- $\sigma$ -Grenze signifikante Beziehungen zwischen Guayaquil, Atuona, Nauru und Penrhyn, die auf den roten Spektrumcharakter der letztgenannten Sekundärstationen zurückzuführen sind. In der o. g. Tabelle von SCHÜTTE ist die Anzahl signifikanter Kkf bei denselben Stationen niedriger als z. B. bei Fanning Island, das hier mit statistisch höherer Signifikanz aufwartet und trotz des roten Spektrums einen deutlichen Jahresgang ausweist.

#### 6.4.3. Kohärente Beziehungen zwischen Wassertemperaturreihen

Von besonderem Interesse sind, wie einleitend bemerkt wurde, die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre. Im Bereich des äquatorialen Pazifiks sind wir in der glücklichen Lage, gut geführte Beobachtungen der Wassertemperatur aus Puerto Chicama zu besitzen. Diese seit 1925 lückenlos existierende Reihe ist für ähnliche Klimagebiete der Erde einmalig. Für weniger lange Zeiträume stehen weitere Reihen zur Verfügung, deren Kohärenzanalysen in Tab. 7/108—110 und Tab. 8/26 und 27 zusammengestellt wurden. Einige weitere Reihen, darunter  $T_w$  Canton Island, liegen erst seit 1950 vor und wurden wegen ihrer Kürze nicht in die Tabellen aufgenommen.  $T_w$  Canton Island und  $T_w$  Puerto Chicama liefern ebenfalls sehr hohe Kkf.

Die Ergebnisse der Kohärenzanalyse der Wassertemperaturen entsprechen den erwarteten Ergebnissen.  $T_w$  Puerto Chicama ist mit  $T_w$  Talara nicht nur im langweiligen, sondern auch im kurzweiligen Bereich kohärent (Tab. 7/110, Tab. 8/27).  $\Delta T_w$  La Libertad gibt nur noch eine schwache Bindung mit Puerto Chicama wieder, die einen geringen Kovarianzanteil aufweist. SCHÜTTE (1966, 1967) wies bereits auf die Besonderheiten dieser Station hin, die den allgemeinen Zirkulationsverhältnissen wegen ungünstiger lokaler Einflüsse kaum folgt.

$\Delta T_w$  Apia und  $\Delta T_w$  Puerto Chicama (Tab. 7/109, Tab. 8/26 zeigen mit Ausnahme des Jahresgangs keine Kohärenz.

#### 6.4.4. Kohärente Beziehungen zwischen Wassertemperatur und Niederschlagsreihen

Die Anomalierreihe von  $T_w$  Puerto Chicama wurde mit einer großen Zahl von Sekundärstationen des Niederschlags gekoppelt und läßt eine gute Abgrenzung des kohärenten Bereichs zu (Tab. 7/78—100). Mit Ausnahme von Christmas Island, das keine signifikanten Beziehungen liefert, sind sämtliche Stationen des äquatorialen Anomaliegebietes im Periodenbereich  $\geq 2$  Jahre mit signifikanten Kohärenzen vorhanden. Mit einem um 50% schwankenden Kovarianzanteil zeigen Fanning, Nauru, Ocean, Canton und Penrhyn Island die besten Zusammenhänge. Im Randgebiet (Pukapuka, Manihiki und Guayaquil) geht der Kovarianzanteil zurück, die Kohärenz weist immerhin noch die 3- $\sigma$ -Grenze überschreitende Werte auf. Sämtliche andere Stationen, auch die Osterinsel (Tab. 8/25) sind mit der Wassertemperatur nicht signifikant korreliert.

Stichprobenartig wurde die Relation der Jahresperiode zu den langweiligen Kovarianzen abgeschätzt. Der sehr gut ausgeprägte Jahresgang in der Wasser-

temperaturreihe von Puerto Chicama spiegelt sich entsprechend bei den vorgenommenen Koppelungen wider (Tab. 8/21—24). Bei der Durchführung von Berechnungen mit Originalreihen, z. B. Korrelationen, wird die Jahresperiode deshalb auch im Anomaliegebiet bestimmte Einflüsse zeigen.

Die Kohärenzanalysen der Wassertemperaturanomalien von La Libertad (Tab. 7/101—107) fallen negativ aus, wie bereits aufgrund der Arbeiten von SCHÜTTE ((43), (2)) zu erwarten war. Der einzige signifikante Kohärenzwert mit Christmas Island (Tab. 7/102) verliert bei Berücksichtigung des Kovarianzanteils von 1% seine Bedeutung.

#### 6.4.5. Zusammenfassende Bemerkungen

Die in Tab. 7 und 8 zusammengestellten Kohärenzen erlauben eine regionale Abschätzung der kohärenten Wechselwirkungen zwischen Niederschlagsreihen und zwischen Niederschlag und Wassertemperatur.

Mit Abb. 19 sei eine synthetische Darstellung der regionalen Ausdehnung signifikanter Anomaliekohärenzen versucht. Der kreuzschraffierte Bereich überdeckt das Gebiet, in dem sämtliche Stationen untereinander gekoppelt signifikante Beziehungen ergaben. Während die Südgrenze dieses Gebiets gut festgelegt werden kann, muß bei der West und Nordgrenze ein gewisser Spielraum offengelassen werden. Die im Restgebiet liegenden Stationen ergaben unter sich und mit Stationen des Anomaliegebietes gekoppelt (mit Ausnahme der Jahresperiode) keine signifikanten Kohärenzen. Angedeutet wurden auch die Bereiche (einfach schraffiert), die zeitweilig mit bestimmten Stationen kohärente Wechselwirkungen zeigten. Gestrichelte Linien verbinden die Orte, bei denen gelegentlich solche Fernbindungen auftraten. Die Bedeutung gerade der gestrichelten Linien darf nicht überschätzt werden (s. Kovarianzanteile in den Tab. 7 und 8).

Als kohärentes Gebiet stellt sich erwartungsgemäß die äquatoriale Trockenzone mit ihren Randgebieten heraus. Taiohae und Atuona liegen außerhalb dieses Gebietes, so daß die von SCHÜTTE (2) dafür gefundenen signifikanten Kkf nicht auf Anomalien, sondern auf die Jahresperiode zurückgeführt werden müssen.

Innerhalb des kreuzschraffierten Bereichs ist die Kovarianz der signifikanten Periodenbereiche positiv, d. h. hohe Niederschläge sind miteinander und mit hohen Wassertemperaturen gekoppelt. Die gestrichelten Bereiche mit ihren wesentlich schwächeren Bindungen zeichnen sich durch Gegenläufigkeit der Ereignisfolgen aus (negative Kovarianz).

Bei der Diskussion der weiteren Ergebnisse können wir uns auf den als Kohärenzgebiet kreuzschraffierten Bereich beschränken.

#### 6.5. Phasendifferenzen im Kohärenzgebiet

Die signifikante Kohärenz  $K^2$  ist gleichzeitig das Kriterium für die Signifikanz der Phasendifferenz im betreffenden Periodenbereich. Betrachtungen über Phasendifferenzen sind deshalb nur im Kohärenzgebiet möglich.

In Tab. 9 wurden die Phasendifferenzen signifikanter Frequenzbereiche zusammengestellt. Jeder Differenz ist der Zufallsbereich ( $p = 95\%$ ) angefügt. Die Anordnung der Basis- und Sekundärstationen ähnelt der Tab. 7. Positive (negative) Vorzeichen bedeuten ein Vorlaufen (Nachhinken) der Basisstation.

Aus bestimmten, später näher erläuterten Gründen wurden für einige Periodenbereiche, die nicht signifikant sind, ebenfalls Phasendifferenzen in Tab. 9 aufgenommen. Diese Werte sind eingeklammert. Gleiche

Vorzeichen und Größenordnungen mit benachbarten signifikanten Periodenbereichen dürfen nicht als Kriterium ihrer Güte aufgefaßt werden. Die Analyse mehrerer Zufallsreihen ergab, daß die Phase zeitweilig geordnete Werte lieferte, denen man bei Koppelung von Beobachtungswerten vielleicht reelle Bedeutung zusprechen würde.

#### 6.5.1. Größenordnung der Phasendifferenzen

Bereits im Abschnitt 6.3 wurden einige Phasendifferenzen diskutiert, und es wurde festgestellt, daß deren Beträge relativ klein sind. Die in Tab. 9 wiedergegebenen Werte zeigen auch bei anderen Stationen ein Überwiegen der kleinen Differenzen. Nur die an der Südgrenze des Kohärenzgebietes liegenden Stationen Pukapuka, Manihiki und Penrhyn, sowie Guayaquil im Küstengebiet fallen durch etwas größere Ziffern auf. Nauru und Malden Island ergeben bei der 2. Harmonischen einen Wert von 4,3, bzw. 4,6 Monaten, der bei den folgenden Harmonischen rasch auf Werte  $\leq 2$  Monate zurückgeht.

In Abschnitt 6.3 wurde auf die praktische Bedeutung dieser Phasendifferenzen hingewiesen. Obwohl für den physikalischen Zusammenhang die absolute Phasendifferenz von Bedeutung ist, sollte man den zeitlichen Unterschied im Ablauf der Anomalien an verschiedenen Stationen in Relation zur Periodenlänge setzen. Der relative Zeitunterschied wird in den meisten Fällen sehr klein und schränkt u. a. die prognostische Verwertbarkeit der signifikanten Wechselwirkungen stark ein. Tab. 10 gestattet, den relativen Zeitunterschied zu bestimmen. Die hier gefundenen Differenzen ordnen sich links der eingezeichneten Stufenlinie ein. Mit etwa 17% ergibt sich somit die größte Differenz, die bei der Koppelung von  $\Delta T_w$  Puerto Chicama —  $\Delta R$  Manihiki auftritt. Die Niederschlagsanomalien lassen etwa 15% als Höchstwert erkennen ( $\Delta R$  Canton Island —  $\Delta R$  Manihiki). Die erwähnten Phasendifferenzen zwischen  $\Delta R$  Nauru und  $\Delta R$  Malden Island mit 4,3 — 4,6 Monaten ergeben einen relativen Zeitunterschied von 7—8%. Bereits in diesem Fall wird es schwierig sein, die Beziehung prognostisch auszuwerten, wenn man berücksichtigt, daß es nicht möglich ist, anhand einer vorliegenden Zeitreihe zu bestimmen, ob eine sich anbahnende Anomalie die Periodenlänge von 60 Monaten aufweist. Bei sämtlichen anderen Phasendifferenzen wird man deshalb im allgemeinen von keinem praktisch bedeutungsvollen Zeitunterschieden sprechen können.

Die Bedeutung größerer Phasendifferenzen und damit der Kohärenzanalyse kann am Beispiel der Stationen Canton — Manihiki demonstriert werden. Wie die Kohärenzanalyse gezeigt hat, bestehen im langwelligen Periodenbereich signifikante Wechselwirkungen mit einer mittleren Phasendifferenz von 7—8 Monaten. Aufgrund dieser Ergebnisse ist zu erwarten, daß die Berechnung von Korrelationskoeffizienten der Jahressummen des Niederschlags unter Berücksichtigung einer zeitlichen Verschiebung von 8 Monaten höhere Werte gibt, weil die zufälligen Schwankungen im kurzwelligen Bereich eliminiert werden.

Tab. 11 zeigt im Fall d), daß diese Vermutung richtig ist. Sowohl nach der 3- $\sigma$ -Grenze als auch nach dem Pearson-Kriterium (6 F) ist dieser Kkf. signifikant. Die direkte Koppelung der Jahressummen und nach dem 6F-Kriterium auch die direkte Koppelung der Monatsanomalien zeigen keine signifikanten Werte; nur der unter b) erwähnte maximale Kkf. der Anomalien ist bei einer zehnmonatigen Verschiebung nach beiden Kriterien signifikant.

Es fällt auf, daß die relativ strengen Zufallskriterien auch in den als signifikant bezeichneten Beispielen b) und d) gerade erreicht oder überschritten werden. Eine

Erklärung dafür liefert der Kovarianzanteil zwischen Canton und Manihiki (= 38%, Tab. 7/54), der deutlich gegenüber den besser gekoppelten Stationen des zentralen Kohärenzgebietes abfällt.

### 6.5.2. Richtung der zeitlichen Verschiebungen

Der vorangehende Abschnitt ließ erkennen, daß eine gesonderte Betrachtung der Phasendifferenzen in jedem Periodenbereich wenig sinnvoll ist. Da die Kovarianzbereiche wegen der Glättung nicht voneinander unabhängig sind, wurden in Tab. 9 die signifikanten Differenzen gemittelt.

Für verschiedene Basisstationen konnten aufgrund dieser Mittelwerte Karten entworfen werden, in denen die zeitlichen Verlagerungen und damit auch die Richtung des Fortschreitens von Anomalien im Kohärenzgebiet deutlicher zum Ausdruck kommen als in Tabellen. An den Abb. 20a—e fällt zunächst der relativ einheitliche zonale Verlauf der Isochronen auf, die nur im äußersten Westteil des Kohärenzgebietes (westlich Canton Island) bei den Niederschlagsanomalien nach Südwest abgelenkt sind. Dieses Bild ist unabhängig von der Basisstation, dem Zeitraum und der Anzahl der vorliegenden Sekundärstationen. Einen praktisch rein zonalen Verlauf zeigen die auf  $T_w$ -Anomalien bezogenen  $\Delta R$ -Reihen in Abb. 20e. Die Richtung der Ausbreitung geht im Westteil des Kohärenzgebietes (westlich Canton Island) etwa von NW nach SE. Nach Osten fortschreitend, dreht dieser Vektor mehr und mehr auf S-Richtung ein, die er auf 160° westlicher Länge (Fanning und Malden Island) erreicht. Über eine unterschiedliche Verlagerungsgeschwindigkeit der Anomalien in den einzelnen Teilen des Kohärenzgebietes geben die Abb. 20a—e wenig Auskunft. Die auf  $\Delta R$  Canton Island und  $\Delta T_w$  Puerto Chicama bezogenen Phasendifferenzen in Ab. 20d und 20e lassen im West- und Nordteil eine sehr rasche und im Südteil eine wesentlich langsamere Verlagerung erkennen. In Abb. 20d wurde allerdings keine lineare Interpolation der Nullisochrone im Bereich der Malden-Insel vorgenommen, da Abb. 20a—c nördlich der Linie Malden — Canton Island deutlich ein schnelles Vordringen der Anomalien vermuten lassen. Selbst eine lineare Interpolation würde die o. g. unterschiedlichen Verlagerungen in Abb. 20d erkennen lassen. Die größeren zeitlichen Verschiebungen am Südrand des Kohärenzgebietes verlieren etwas an Bedeutung, weil der Kovarianzanteil nicht sehr groß ist (Tab. 7).

Der Ursprung der Anomalien scheint somit am Nordwest- und Nordrand des Kohärenzgebietes zu liegen. Sie breiten sich von dort bis in das Zentrum der äquatorialen Trockenzone (Canton und Malden Island) sehr rasch aus. Ob es dieselben Anomalien sind, die selten und mit größerer Verspätung den Südrand des Kohärenzgebietes im zentralen Pazifik erreichen, kann aufgrund der weniger guten Koppelung dieser Stationen nicht eindeutig bewiesen werden. Berücksichtigt man die normale Eintrittszeit der Anomalien im Trockengebiet (Nordwinter- bis Nordfrühjahrsmonate), ergibt eine weitere zeitliche Verschiebung von 6—10 Monaten für die Reihen von Pukapuka und Manihiki bereits ein Zusammenfallen der Ereignisse mit der Eintrittszeit des nächsten Jahresniederschlagsmaximums. Die Überlegungen sind für die Koppelungen mit  $\Delta R$  Canton und den Wassertemperaturanomalien von Puerto Chicama gleichermaßen gültig.

In erster Näherung können damit die Ergebnisse der systematischen Korrelationen von SCHÜTTE (2) bestätigt werden, die entlang der zonalen Achse der Trockenzone ein gleichzeitiges Auftreten von Anomalien ergaben. Die zeitlichen Verschiebungen am Südrand des Kohärenzgebietes liegen ebenfalls in der gleichen Größenordnung. Unterschiedlich sind die Phasendifferenzen

am Nordrand (Fanning Island). Stichproben der Kohärenz der Jahresperiode mit R Guayaquil klären diese Differenzen (Tab. 12): R Fanning Island weist größenordnungsmäßig und dem Vorzeichen der Phasendifferenz nach bei der Jahresperiode den von SCHÜTTE gefundenen Wert auf. Interessant sind in Tab. 12 u. a. die Phasendifferenzen der Jahresperiode von R Guayaquil und R Nauru, die bei etwa —1 Monat liegen, während die Darstellung von Schütte bei Nauru eine positive Differenz von fast 4 Monaten erkennen läßt.

Bei der Abschätzung zeitlicher Verschiebungen aufgrund von Korrelationsrechnungen mit zeitlich versetzten Beobachtungswerten, ist es offensichtlich nicht möglich zu entscheiden, welchem Frequenzbereich die signifikanten Kkf. angehören. Es tritt bei den einzelnen Koppelungen eine unterschiedliche Filterung auf, deren Filtercharakteristik unbekannt ist. Eine Abhängigkeit vom Spektrum der einzelnen Reihen wäre denkbar. Bei den Stationen, die einen weniger gut ausgebildeten Jahresgang im Spektrum aufweisen, ergibt die Korrelationsanalyse zeitliche Verschiebungen, die sich mit denen der Anomaliekohärenzen (Nauru, Canton, Penrhyn), und bei Fanning Island mit gut ausgebildetem Jahresgang solche, die sich mit der ebenfalls kohärenten Jahresperiode decken.

Weiter oben wurde bereits erwähnt, daß im Kohärenzgebiet zum Teil signifikante Periodenbereiche bei etwa 10 Monaten auftreten. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte diesem Frequenzbereich keine größere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Eine grobe Sichtung der entsprechenden Daten zeigt Phasendifferenzen, die, von der zonalen Achse des Trockengebietes ausgehend, nach Norden und Süden positiv zeitliche Verschiebungen von 1—2 Monaten (inklusive Atuona und Taiohae!) aufweisen. Dieses Bild entspricht weitgehend der Abb. 2 von SCHÜTTE, wenn eine unterschiedliche Auswirkung der Filterung bei Korrelationsanalysen unterstellt wird. Abb. 20f gibt vollständigshalber die Phasendifferenzen dieses Frequenzbereiches, bezogen auf die Basisstation Canton Island, wieder. Der Kovarianzanteil des Periodenbereichs verhält sich zu dem der langwelligen Erscheinungen etwa wie 1:10. Auch bei den Kohärenzanalysen mit den Wassertemperaturanomalien von Puerto Chicama traten ähnliche Beziehungen auf.

### 6.5.3. Phasendifferenzen der Jahresperiode des Niederschlags

Bei einzelnen, hier nicht näher diskutierten Kohärenzanalysen von Originalreihen fiel auf, daß die Phasendifferenzen im langwelligen Bereich und bei der Jahresperiode entgegengesetzte Vorzeichen haben. Es schien deshalb nicht uninteressant zu sein, auch für die Jahreswelle eine Isochronendarstellung zu entwerfen. Als Basisstation wurde R Apia gewählt und für den Zeitraum 1937/65 mit den meisten Stationen einer Kohärenzanalyse unterworfen. Ausnahmen stellen die Stationen Malden Island, Tulagi und Juan Fernandez dar, von denen keine simultanen Beobachtungen vorliegen. Abb. 21 gibt die Phasenbeziehungen für den zentralen Pazifik wieder. Bemerkenswert ist die gegenüber der Umgebung stark verspätete Eintrittszeit des Maximums der Jahreswelle im äquatorialen Bereich, die sich von Osten her bis etwa 180° Länge erstreckt. Zwischen 140° W und 170° E verlagert sich das jährliche Niederschlagsmaximum von Norden und Süden her auf den Äquator zu (mit einer westlichen Komponente im West- und Südteil des Anomaliegebietes), wobei der Ursprung in den regenreichsten Zonen des behandelten Gebietes zu liegen scheint (ITCZ und das Gebiet von den Salomon-Inseln über Samoa zu den Gesellschafts-Inseln). Die zeitlichen Verzögerungen in der Eintrittszeit des Niederschlagsmaximums werden von West nach Ost rasch

größer und erreichen auf den Marquesas-Inseln Werte, die denen der Subtropen der Südhalbkugel ähneln (Norfolk Island, Gebiet zwischen der Osterinsel und Isla de Juan Fernandez). Bereits Canton und Fanning Island weisen zeitliche Differenzen von etwa 3 Monaten gegenüber Tahiti, Apia und Nauru auf.

Zieht man eine Linie (doppelt strichliert in Abb. 21), die die Grenze zwischen den entgegengesetzten meridionalen Verlagerungen des Niederschlagsmaximum bildet, so findet man deren westliches Ende südwestlich Nauru auf etwa  $3^{\circ}$  S und von dort aus zwischen dem Äquator und etwa  $3^{\circ}$  S nach Osten verlaufend. Diese Linie deckt sich mit der meridionalen Achse des Trockengebietes und läßt vermuten, daß im normalen Jahreslauf niederschlags erzeugende meteorologische Faktoren sukzessive versuchen, die Trockenzone im zentralen Pazifik einzuengen. Diese Erscheinung steht im Gegensatz zu den in Abb. 20 dargestellten Anomalien, die eine einheitliche Verlagerung im Anomaliegebiet von Nord nach Süd erkennen lassen. Bemerkenswert ist die im Westteil der Abb. 21 zu erkennende einheitliche N-S-Verlagerung der Jahreswelle von etwa  $10^{\circ}$  N an bis mindestens  $15^{\circ}$  oder  $20^{\circ}$  S, die offensichtlich auf das südostasiatisch-australische Monsunregime zurückzuführen ist und gut mit dem in Abb. 3 dargestellten Schwankungsbereich der ITC übereinstimmt.

#### 6.5.4. Phasendifferenzen zwischen Wassertemperatur und Niederschlag am selben Ort

Für die Stationen Canton Island und Apia liegen seit 1950, bzw. 1944 neben den Niederschlagsreihen auch Wassertemperaturbeobachtungen vor.

SCHÜTTE (2) machte darauf aufmerksam, daß bei Korrelationen beider Klimatelemente für Canton Island ein leichtes Vorlaufen des Niederschlags gegenüber der Wassertemperatur zu beobachten sei. Die in Tab. 13 zusammengestellten Ergebnisse der Kohärenzanalyse von  $T_w - R$  Canton Island und Apia bestätigen das: Sämtliche Phasendifferenzen signifikanter Periodenbereiche, selbst des Jahresganges bei Apia, zeigen negative Vorzeichen. Die Differenzen sind klein, weisen aber einheitlich auf ein Vorlaufen des Niederschlags gegenüber der Wassertemperatur hin. Bemerkenswert ist das Fehlen eines kohärenten Jahresganges bei Canton Island. Im kurzwelligen Bereich beider Stationen treten einzeln signifikante Perioden auf, deren Phasendifferenzen unterschiedlichen Vorzeichens sind. Canton Island zeigt bei etwa 3 Monaten eine Phasendifferenz von  $+0.1$  bis  $+0.3$  Monaten, während Apia in diesen Frequenzbereichen durchgehend negative Differenzen aufweist, wobei die Kovarianzanteile verschwindend gering sind.

Die auslösende Rolle atmosphärischer Zirkulationsverhältnisse im Periodenbereich  $\geq 1$  Jahr bestätigt sich; damit erweist sich die von BJERKNES (4) betonte Bedeutung der Oberflächentemperatur des Wassers als sekundärer Effekt. Als Ursache der großräumigen Zirkulationsanomalien kommen daher anscheinend in erster Linie Änderungen atmosphärischer und nicht ozeanischer Zustandsgrößen in Frage.

#### 6.5.5. Zusammenfassende Bemerkungen

Im äquatorialen Anomaliegebiet treten im Periodenbereich über zwei Jahre signifikante Phasendifferenzen auf. Der absolute Betrag der zeitlichen Verschiebungen ist gemessen an der Periodenlänge klein und für prognostische Zwecke kaum verwertbar, da er gewöhnlich zwischen 0 und  $5\%$  liegt. Obwohl die meisten Phasendifferenzen relativ klein sind, gestatten sie eine eindeutige Festlegung der Verlagerungsrichtung. Anomalien breiten sich vom Nordwest- und Nordrand des Kohärenzgebietes rasch nach Südosten und Süden aus.

Dabei geht man sicher mit der Annahme nicht fehl, daß die positiven Niederschlagsanomalien als Ursache für die hohen Varianz- und Kovarianzanteile der Spektre im langwelligen Bereich angesehen werden können. Das Zusammenfallen der mittleren Position der ITC mit der Nordgrenze des Kohärenzgebietes läßt unmittelbare Zusammenhänge vermuten. Das Verhalten der Ausbreitungsrichtung der Jahreswelle deckt sich nur im äußersten Nordostteil des Anomaliegebietes mit den niedrigfrequenten Erscheinungen. Im Südteil herrscht eine entgegengesetzte Verlagerungsrichtung vor. Die Kohärenzanalyse von Niederschlag und Wassertemperatur am selben Ort ergibt bei langperiodischen Erscheinungen ein leichtes Vorlaufen des Niederschlags.

### 7. Ergebnisse

Anomalien treten im Trockengebiet vor allem im Periodenbereich über drei Jahre auf. Im unmittelbaren Äquatorbereich (etwa  $\pm 2^{\circ}$  Breite) ist ein Periodenbereich von etwa 20—30 Monaten („zweijähriger Zyklus“, biennial pulse) von zeitweiliger Bedeutung. Die Niederschlagsspektre lassen im äquatorialen, mittleren Pazifik ein Gebiet erkennen, in dem die Bedeutung der Jahresperiode stark zurückgeht und zum Teil statistisch nicht mehr signifikant ist. Der Varianzanteil des Jahresganges beträgt dort zum Teil nur noch  $10\%$ , während er in den niederschlagsreicheren Gebieten 25—40% ausmacht. Diese stark verzerrten, roten Spektre eignen sich gut zur Abgrenzung des Einflußgebietes der äquatorialen Niederschlagsanomalien (Spektrumtypen 2 und 3 in Abb. 14).

Bei der Kohärenzanalyse erweisen sich die Stationen mit Spektrumtyp 2 und 3 als diejenigen, die im größten Umfang kohärente Erscheinungen aufweisen, und die Abgrenzung eines „Kohärenzgebietes“ ergibt eine ähnliche regionale Ausdehnung wie die genannten Spektrumtypen (Abb. 19). In der Möglichkeit der Abschätzung des Kovarianzanteils signifikanter Periodenbereiche liegt ein wesentlicher Vorteil der Kohärenzanalyse. Er gestattet eine Beurteilung der Stärke und Bedeutung der signifikanten Wechselbeziehungen, die sich am Beispiel der Koppelung einzelner Stationen des äquatorialen Pazifiks mit Stationen der Subtropenzone (z. B. Malden Island mit Norfolk Island und Rarotonga) als nur schwach herausstellen und anscheinend nur zeitweise vorhanden sind. Im Bereich der äquatorialen Trockenzone lassen Kohärenzanalysen von Anomalie-reihen erkennen, daß der Kovarianzanteil von Periodenbereichen größer als 20 Monate zwischen etwa 30 und  $70\%$  liegt und damit der Bedeutung nach fast mit dem Kovarianzanteil des Jahresganges im niederschlagsreichen Gebiet verglichen werden kann (Apia liefert mit Norfolk, Papeete, Port Vila, Rarotonga und Suva einen Kovarianzanteil des Periodenbereichs von 10—15 Monaten in Höhe von 58—83%, dagegen Fanning Island mit Norfolk, Papeete und Rarotonga von nur 5—28%).

Das Abschätzen von Phasenverschiebungen gewährt für signifikante Periodenbereiche erstmals einen statistisch prüfbaren Einblick in den zeitlichen Ablauf und die Richtung der Verlagerung von Anomalien. Trotz relativ weitmaschiger Beobachtungen läßt sich für den Periodenbereich größer als 20 Monate eine Verlagerung der Anomalien zumindest im Westteil der äquatorialen Trockenzone von Nord nach Süd feststellen. Die mittlere Verlagerungs- und Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt im Zentral- und Nordteil der Trockenzone zwischen 10 und 40 km/Tag und wird am Südrand erst wesentlich kleiner. Innerhalb eines Zeitraumes von 1—2 Monaten dringen im Mittel Anomalien von etwa  $2-5^{\circ}$  Nordbreite bis in den Zentralteil der Trockenzone ( $1-4^{\circ}$  Süd) vor. Die Verlagerungsrichtung dieser Anomalien ist nur im äußersten Nord- und Ostteil des zentralen Pazifiks mit der der Jahreswelle identisch. Im Zentral- und Südteil

der Trockenzone dringt die Jahreswelle von Süden nach Norden vor. Somit ist die Entstehung und der Ursprung der großen Niederschlagsanomalien im Zentralteil der Trockenzone mit großer Wahrscheinlichkeit nicht in einer extremen Verstärkung der Amplitude der jahreszeitlichen Schwankungen der allgemeinen Zirkulation zu suchen. Ihre Ursachen scheinen in großräumigen, wenn nicht sogar globalen Zirkulationsanomalien zu liegen, wie sie erstmals bei der Anomalie im Winter 1957/58 auf der Nordhalbkugel beobachtet wurden BJERKNES (4), NAMIAS (44), (32)).

FLOHN (20) (45) hat besonders auf die starken Unterschiede im hemisphärischen Temperaturgefälle zwischen den Polen und dem Äquator hingewiesen, die zu allen Jahreszeiten zugunsten der Südhalbkugel ausfallen und als Ursache für die im Mittel nördlich des Äquators liegende ITC anzusehen sind. Im Falle der umfangreichen Niederschlagsanomalien im Trockengebiet sind demnach auf der Südhalbkugel ähnliche Umstellungen der atmosphärischen Zirkulationsverhältnisse zu erwarten. Ohne eine Abschwächung oder einen zeitweiligen Abbau des südostpazifischen Hochs und damit ein Ausbleiben des SE-Passats sind die Anomalien des Trockengebietes nicht zu verstehen.

BERLAGE (46) und SCHELL (47) (48) wiesen auf die mit etwa 2- bis 2.5jährigen Rhythmus bestehende Luftdruckschaukel zwischen dem Südpazifik und dem Indischen Ozean hin (damit auf die von G. WALKER ausgesprochene Theorie der „southern oscillation“ hinweisend), die als mögliche Ursache für die Anomalien auch der Äquatorialzone in Betracht käme. Sie soll nicht nur die Druckverteilung, sondern auch wesentlich die Oberflächenströmungen des Meeres, dessen Wärmeaustausch und die ozeanische Advektion beeinflussen, d. h. der Kaltwassertransport im Peru- und Südäquatorialstrom sollte ähnlichen Schwankungen unterworfen sein und außerdem größere zeitliche Unterschiede im Verhalten gleichgerichteter Anomalien zwischen der südamerikanischen Westküste und dem äquatorialen Zentralpazifik erkennen lassen. Die Spektrumanalyse läßt bereits erkennen, daß im Bereich der äquatorialen Trockenzone einem etwa zweijährigen Rhythmus nur untergeordnete Bedeutung zukommt. Die Kohärenzanalyse zwischen den Wassertemperaturanomalien in Puerto Chicama und den Niederschlagsanomalien im Zentralpazifik ergibt zwar enge Beziehungen, die positiven Koppelungen fallen jedoch im wesentlichen in den Periodenbereich  $>3$  Jahre.

Die Bedeutung advektiver Transporte an der Meeresoberfläche ist sicherlich in vielen Fällen nicht zu unterschätzen, darf jedoch im Bereich der Trockenzone wohl nicht in dem Sinne eines einfachen Kreislaufs von Wassermassen aus den subarktischen Gewässern über den Perustrom und den Südäquatorialstrom usw. verstanden werden. Dem steht entgegen, daß unter dem Äquator normalerweise selbst ein Auftriebswassergebiet zu finden ist (zweiseitige Ekmandivergenz), daß die größten Versetzungsgeschwindigkeiten im Peru- und Südäquatorialstrom mit starkem SE-Passat verbunden sind, ein gut ausgebildeter Passat jedoch mit stabiler Schichtung und Trockenheit verbunden ist und daß partielle Anomalien auftreten. Die regionale Verteilung der Phasendifferenzen ist mit einer Ost-West-Verlagerung nicht vereinbar.

ICHIYE und PETERSEN (22) und BJERKNES (4) weisen aufgrund der Anomalie des Winters 1957/58 ebenfalls auf die erhöhte Wassertemperatur hin. Als Hauptgrund werden jedoch keine advektiven Transporte im Sinne der „southern oscillation“ (d. h. also von Ost nach West) angenommen, sondern eine südwärts gerichtete Ausdehnung des äquatorialen Gegenstroms oder der an die Oberfläche tretende Cromwell-Strom. Diese Erscheinungen stehen in formaler Übereinstimmung mit den hier gewonnenen Ergebnissen der Ko-

härenzanalyse, die eine relativ rasche Südwärtsverlagerung der Anomalien und im Zentralteil der Trockenzone ein praktisch gleichzeitiges Auftreten erkennen lassen.

Die Annahme, daß die Ursachen der enormen positiven Niederschlagsanomalien allein in der Erhöhung der Wassertemperatur zu suchen sind, wird jedoch durch die von Canton Island vorliegenden Wassertemperaturbeobachtungen nicht eindeutig gestützt (SCHÜTTE (2)). Die Kohärenzanalyse läßt eher ein geringes Vorlaufen des Niederschlags gegenüber der Wassertemperatur erkennen.

Die Ursachen für die anomalen Regenfälle im Trockengebiet scheinen somit in erster Linie in atmosphärischen Zirkulationsanomalien zu liegen, während die damit verbundenen hohen Wassertemperaturen einen sekundären Effekt darstellen.

Als zukünftige Arbeitshypothese für die Untersuchung der starken positiven Niederschlagsanomalien im äquatorialen pazifischen Trockengebiet („El-Niño“-Phänomen) könnte folgende Modellvorstellung dienen: Großräumige und längere Zeit (Dimension : Monate) anhaltende atmosphärische Zirkulationsanomalien führen zum Ausbleiben des SE-Passats. Als Folge davon werden der Kaltwasserauftrieb an der südamerikanischen Westküste und am Äquator ausbleiben und die Oberflächentemperaturen steigen (Strahlung und Advektion wärmeren Oberflächenwassers). Mit den Änderungen der atmosphärischen Zirkulationsverhältnisse gehen gleichzeitig Änderungen der Vorticity-Verteilung in der oberen Hälfte der Troposphäre und der vertikalen Temperaturgradienten einher. Da die Umstellung der Meeresoberflächenzirkulation und der Temperaturverteilung nur langsam vonstatten geht, treten bereits in diesem Stadium etwas häufiger Niederschläge im Trockengebiet auf. Ist die Umstellung der Temperaturverteilung an der Meeresoberfläche beendet, d. h. treten auch dort tropische Temperaturen auf (26—28° C), können diese zu verstärkter Konvektion Anlaß bieten und die enormen positiven Niederschlagsanomalien im Trockengebiet begünstigen.

Das leichte Vorlaufen des Niederschlags gegenüber der Wassertemperatur wäre dadurch erklärbar. Die Seltenheit des Auftretens von „El-Niño“-Jahren resultiert aus der langen Umstellzeit der Oberflächenströmungen des Meeres (sehr große Erhaltungseignung). Wahrscheinlich sind die einen oder anderen Bedingungen, die eine höhere Niederschlagsbereitschaft fördern, wesentlich häufiger vorhanden. Sie treten jedoch nicht gleichzeitig auf. Das rasche Abklingen einer atmosphärischen Anomalie und die Wiederherstellung der normalen Zirkulationsformen ist bereits wieder mit stabiler Luftschichtung verbunden und die vielleicht gerade vorhandenen hohen Wassertemperaturen können keine hoch reichende, stärkere Konvektion mehr hervorufen. Für diese lange Umstellzeit sprechen die Autokorrelationskoeffizienten der Wassertemperatur. Tägliche Wind- und Wassertemperaturbeobachtungen von Puerto Chicama lassen erkennen, daß der SE-Passat mehrere Wochen vor kräftigen und länger anhaltenden Erhöhungen der Wassertemperatur schwächer wird oder ausbleibt.

Die Ausdehnung der äquatorialen Wärmequelle im Sinne des BJERKNES-Modells müßte zu einer Verstärkung der Zirkulation der beiden Hadley-Zellen führen. Damit aber lebt der Passat erneut auf und stellt das normale Zirkulationssystem mit östlichen Winden, stabiler Schichtung und dem äquatorialen Auftriebswassergebiet wieder her.

## 8. Abschließende Bemerkungen

Die vorgelegten Untersuchungen stellen das Ergebnis stochastischer Zusammenhänge dar, die prinzipiell keine allgemeinen Schlußfolgerungen bezüglich kausaler Be-

ziehungen erlauben. Wenn trotzdem in einzelnen Fällen kausale Zusammenhänge angedeutet wurden, so sind sie physikalisch einfach zu erklären (Beziehung Wassertemperatur — Niederschlag). Nicht mehr einfach physikalisch zu erklären ist z. B. die durch das gesamte Kohärenzgebiet von Norden nach Süden gerichtete Phasendifferenz der Niederschlagsanomalien. Wohl kann im Nord- und Zentralteil der Trockenzone an eine Ausweitung des Einflusses der ITC gedacht werden, wie sie auch ICHIYE und PETERSEN (22) und BJERKNES (4) aussprachen. In diese Modellvorstellung passen nicht mehr die großen zeitlichen Verschiebungen am Südrand der Trockenzone, die bereits mit dem jährlichen Niederschlagsmaximum des Folgejahres zusammenfallen. Wie bereits in der Einleitung bemerkt, stellt der Niederschlag wegen seiner komplexen Entstehungsursachen kein gutes Zirkulationskriterium dar. Den kausalen Zusammenhängen kommt man wahrscheinlich näher, wenn andere atmosphärische Parameter, wie z. B. Druckgradienten, Lage atmosphärischer Aktionszentren, vertikale Schichtung der Troposphäre und entsprechende Parameter der ozeanischen Zirkulation in derartige Untersuchungen einbezogen werden. Bislang liegen für das hier bearbeitete Gebiet entsprechende Werte nicht in ausreichender Anzahl vor.

Daß die Methode der Kohärenzanalyse einen wertvollen Beitrag zur Klärung von meteorologischen Fernbindungen und anderen Zusammenhängen geben kann, steht außer Frage. Trotzdem darf sie nicht zum Selbstzweck werden. Sie vermittelt einen umfassenden, praktisch lückenlosen Überblick über die Varianz- und Kreuzvarianzstruktur von Zeitreihen und läßt somit auf einfache Weise die Perioden- (oder Frequenz-) Bereiche von Zeitreihen finden, in denen weiterführende Analysen sinnvoll sind (z. B. Filteranalyse). Sie gestattet erste statistisch prüfbare Abschätzungen von Phasendifferenzen, die z. B. anhand von synchronisierten Ereignisfolgen auf sehr einfache Weise erweitert werden können.

Neben dieser Stellung als Schlüssel zum Aufdecken kohärenter Zusammenhänge, der besonders unempfindlich gegenüber autokorrelierten Reihen ist, sollte die Möglichkeit der Durchführung partieller Kohärenzanalysen geprüft und weiterentwickelt werden. Unter dieser Methode kann man in Anlehnung z. B. an die partielle oder bedingte Korrelation eine Kohärenzanalyse verstehen, in der dritte Parameter fixiert werden. Ein praktisches und interessantes Beispiel im Rahmen dieser Untersuchung würde z. B. die partielle Kohärenzanalyse zweier Niederschlagsanomalieereihen im Trockengebiet bei festen negativen oder positiven Wassertemperaturanomalien darstellen.

Zur Frage der Zirkulationsanomalien im hier diskutierten Gebiet wäre eine Ausdehnung der Kohärenzanalyse auf die gesamte südamerikanische Westküste interessant gewesen. Eine Möglichkeit der Abgrenzung z. B. krisenhafter Klimagebiete durch den Varianzanteil der Jahresperiode am Niederschlag innerhalb der Spektrumtypen 2 und 3 könnte unter Umständen ein neues, interessantes Klimakriterium sein.

Herrn Professor Dr. H. FLOHN, Direktor des Meteorologischen Instituts der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn, gebührt in erster Linie mein Dank für die Überlassung des Themas, die in zahlreichen Diskussionen gegebenen Anregungen und die Unterstützung durch sein Institut.

Herrn Prof. G. HOFMANN, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität Köln, bin ich für zahlreiche Anregungen und kritische Hinweise bei der Durchsicht des Manuskripts zu Dank verpflichtet.

Es ist mir eine besonders angenehme Pflicht, allen denen zu danken, die bei der Beschaffung des Beobachtungsmaterials behilflich waren. So stellten die im

Quellenverzeichnis genannten Wetterdienste uneigennützig Daten zur Verfügung, die nicht nur vorliegendes Material ergänzten, sondern zum Teil noch nicht veröffentlichte, vollständige lange Reihen enthielten.

Herrn Dr. E. SÜSSENBERGER, Präsident des Deutschen Wetterdienstes, danke ich für die Aufnahme der Arbeit in die „Berichte des Deutschen Wetterdienstes“. Der Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach und der Bibliothek des Seewetteramtes in Hamburg spreche ich meinen Dank für die Unterstützung aus.

Herrn Reg.-Dir. Dr. M. RODEWALD gilt mein Dank für die Überlassung der Wassertemperaturreihe von Puerto Chicama.

Die Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und die US-Army ermöglichte die Durchführung der umfangreichen Berechnungen, die im Rheinisch-Westfälischen Institut für Instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn auf einer IBM 7090/1410-Rechenanlage vorgenommen wurden. Ich möchte diesen Institutionen ebenfalls meinen Dank aussprechen.

Für tatkräftige Mithilfe bei der Aufbereitung des umfangreichen Zahlenmaterials möchte ich auch meiner Frau herzlichst danken.

#### Literatur

- (1) EICKERMANN W.; FLOHN, H.: Witterungszusammenhänge über dem äquatorialen Südatlantik. Bonner Meteor. Abh. 1 (1962).
- (2) SCHÜTTE, K.: Cross-correlations of rainfall and water temperature at the equatorial Pacific. Bonner Meteor. Abh. 7 (1967) S. 53—74.
- (3) BJERKNES, J.: Atlantic air-sea-interaction. Adv. in Geophys. 10 (1964) S. 1—82.
- (4) BJERKNES, J.: A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. Tellus 20 (1966) S. 820 bis 829.
- (5) RODEWALD, M.: Beiträge zur Klimaschwankung im Meere, 10 und 11. Dt. Hydrogr. Z. 11 (1958) S. 78—82; 12 (1959) S. 204 bis 210.
- (6) RODEWALD, M.: Beiträge zur Klimaschwankung im Meere, 13. Beitrag: Die Asymmetrie im zeitlichen Verlauf der Wassertemperatur-Anomalien in Puerto Chicama (Peru). Dt. Hydrogr. Z. 17 (1964) S. 105—114.
- (7) SCHWEIGGER, E.: Die Westküste Südamerikas im Bereich des Perustroms. Heidelberg-München 1959.
- (8) SCHOTT, G.: Geographie des Indischen und Stillen Ozeans. Hamburg 1935.
- (9) SCHOTT, F.: Klimakunde der Südseeinseln. In: Köppen-Geiger, Handbuch der Klimatologie, Bd. IV, Teil T (1938).
- (10) TÜLLMANN, H.: Die Niederschlagsverhältnisse der Südsee-Inseln. Arch. Dt. Seewarte 56 (1936) Nr. 5.
- (11) RIEHL, H.: Tropical Meteorology. New York 1954.
- (12) RIEHL, H.: General atmospheric circulation of the Tropics. Science 135 (1962) S. 13—22.
- (13) Local Climatological Data 1966. Narrative Climatological Summary (Stationen Canton Isl., Eniwetok, Guam, Johnston Isl., Majuro, Ponape Isl.) U. S. Department of Commerce, Washington.
- (14) BROOKS, C. E. P.: The meteorology of Ocean Island during the period 1905—1916. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 44 (1916) S. 50—53.

- (15) BROOKS, C. E. P.; H. W. BRABY (1921): The clash of the trades in the Pacific. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.* 47 (1921) S. 1—13.
- (16) KNOCH, K.: Große Anomalien des Niederschlags in der Äquatorregion des Pazifischen Ozeans. *Ann. Hydr. u. Marit. Meteor.* 55 (1927) S. 361—367.
- (17) SCHOTT, G.: Der Peru-Strom und seine nördlichen Nachbargebiete in normaler und anormaler Ausbildung. *Ann. Hydr. u. Marit. Meteor.* 59 (1931) S. 161—169, 200—213, 240—253.
- (18) KNOCH, K.: Klimakunde von Südamerika. In: Köppen-Geiger, *Handbuch der Klimatologie*, Bd. II, Teil G (1930).
- (19) FLOHN, H.: Intertropical convergence zone and meteorological equator. *Bonner Meteor. Abh.* 5 (1965) S. 49—57.
- (20) FLOHN, H.: Dry equatorial zones and asymmetry of the global atmospheric circulation. *Bonner Meteor. Abh.* 7 (1967) S. 3—8.
- (21) ALBRECHT, F.: A. Monatskarten des Niederschlags im Indischen und Stillen Ozean. B. Monatskarten der Verdunstung und des Wasserhaushaltes des Indischen und Stillen Ozeans. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 29* (1951) S. 1—39.
- (22) ICHIYE, T.; PETERSEN, J. R.: The anomalous rainfall of the 1957—58 winter in the equatorial central Pacific arid area. *J. Meteor. Soc. Japan.* 41 (1963) S. 172—182.
- (23) DOBERITZ, R.: Spectrum and filter analysis of rainfall for equatorial Pacific islands. *Bonner Meteor. Abh.* 7 (1967), S. 9—51.
- (24) ALPERT, L.: The Intertropical Convergence Zone of the Eastern Pacific Region (I). *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 26 (1945) S. 426—342.
- (25) FLOHN, H.: Research aspects of long-range forecasting. *WMO-Techn. Note* 66 (1964) S. 1—11.
- (26) FLOHN, H.: Passatzzirkulation und äquatoriale Westwindzone. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. Ser. B* 3 (1951) S. 3—15.
- (27) SADLER, J. C.: Tiros observations of the summer circulation and weather patterns of the Eastern North Pacific. *Proc. Symp. Trop. Meteor., Rotorua, New Zealand* (1963) S. 553—571.
- (28) BLÜTHGEN, J.: *Allgemeine Klimageographie*. Berlin 1964.
- (29) MALKUS, J. S.; RIEHL, H.: Cloud structure and distribution over the tropical Pacific Ocean. *Tellus* 16 (1964) S. 275—287.
- (30) WIENER, N.: Generalized harmonic analysis. *Acta math.* 55 (1930) S. 117—258.
- (31) TUKEY, J. W.: The sampling theory of power spectrum estimates. In: *Symposium on applications of autocorrelation analysis to physical problems*, Woods Hole, June 13, 1949. Office of Naval Research, NAVEXOS-P-735.
- (32) NAMIAS, J.: Aspects of long-range forecasting. *Arch. Meteor., Geophys, Bioklimat.* 1 (1966) S. 96 bis 133.
- (33) TUKEY, J. W.: The estimation of (power) spectra and related quantities. In LANGER, R. E.; (Ed.); *On numerical approximations*. Madison (1959).
- (34) BLACKMAN, R. B.; TUKEY J. W.: The measurement of power spectra. *New York* (1966).
- (35) GOODMAN, N. R., KATZ, S., KRAMER, B. H., KUO, M. T., Frequency response from stationary noise: Two case histories. *Technometrics* 3 (1961) S. 245—268.
- (36) HAMON, B. V.; HANNAN, E. J.: Estimating relations between time series. *J. Geophys. Res.* 68 (1963) S. 6033—6041.
- (37) STUMPF, K.: *Grundlagen und Methoden der Periodenforschung*. Berlin 1937.
- (38) *Climatic Change. WMO-Techn. Note No. 79* (1966).
- (39) TUKEY, J. W.: Discussion, emphasizing the connection between analysis of variance and spectrum analysis. *Technometrics* 3 (1961) S. 191—219.
- (40) BAUR, F.; LINKES *Meteorologisches Taschenbuch*, Bd. 2 (1953) S. 236—238.
- (41) PANOFSKY, H. A., BRIER, G. W.: *Some applications of statistics to meteorology*. University Park, Penn. (1958).
- (42) HAUBRICH, A. H.: Earth noise, 5 to 500 millicycles per second. *J. Geophys. Res.* 70 (1965) S. 1415 bis 1427.
- (43) SCHÜTTE, K.: *Untersuchungen zur Meteorologie und Klimatologie des El-Niño-Phänomens in Ecuador und Nordperu.* Diss. Univ. Bonn (1966).
- (44) NAMIAS, J.: The meteorological picture 1957—58. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Investig. Rep.* 7 Pt. II (1960) S. 31—41.
- (45) FLOHN, H.: Thermische Unterschiede zwischen Arktis und Antarktis. *Meteor. Rdsch.* 20 (1967) S. 1 bis 3.
- (46) BERLAGE, H. P.: *Fluctuations of the General Atmospheric Circulation of more than One Year, their Nature and Prognostic Value*. *Med. Verh. Kon. Nederl. Meteor. Inst.* 69 (1957).
- (47) SCHELL, I. I.: On the Nature and Origin of the Southern Oscillation. *J. Meteor.* 13 (1956) S. 592—598.
- (48) SCHELL, I. I.: Origin and Possible Prediction of the Fluctuations in the Peru Current and Upwelling. *J. Geophys. Res.* 70 (1965) S. 5529—5540.

**Quellennachweis** (zu. Tab. 3)

- (1) Daten aus dem Archiv des Meteorologischen Instituts der Universität Bonn.
- (2) World Weather Records. *Smithsonian Miscell. Coll.* 79 (1944), (1. Repr.) 105 (1947); 1941—50 (1959).
- (3) *Monthly Climatic Data for the World*, Washington 1955—65.
- (4) SCHOTT, G. s. Lit. (9).
- (5) SCHWEIGGER, E. s. Lit. (7).
- (6) Meteorological Department, Condominium des Nouvelles-Hébrides (Port Vila).
- (7) Oficina Meteorologica de Chile.
- (8) Empresa Agricola Chicama Ltda.
- (9) REED, W. W.: *Climatological Data for the Tropical Islands of the Pacific Ocean (Oceanica)*. *Monthly Weather Rev., Suppl. Nr. 28* (1927).
- (10) Réseau Mondial, London, 1914—1927.
- (11) Meteorological Department Western Samoa (Apia).
- (12) *Local Climatological Data 1966*. Environmental Science Services Administration (ESSA).
- (13) Meteorological Office, Bracknell.
- (14) Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Hamburg.
- (15) RODEWALD, M. s. Lit. (6).
- (16) Ministerio de Fomenta, Servicio Meteorologico Nacional, Lima 1934—37 (Monatl. Klimatabellen).
- (17) ESSA, US-Weather Bureau, Washington.
- (18) Pers. Mitteilung v. Herrn Dr. M. RODEWALD, Hamburg (1966).

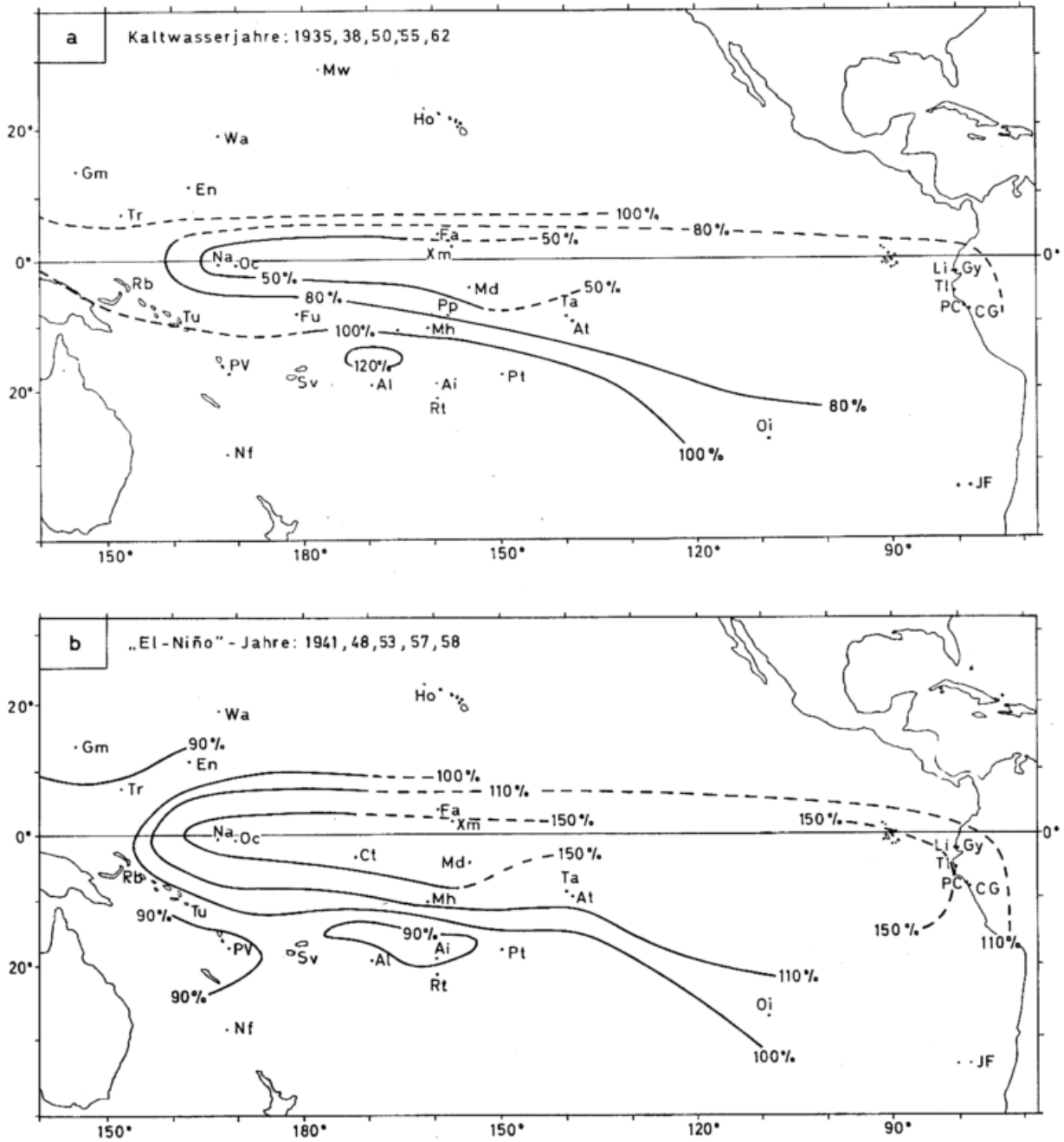


Abb. 1  
Mittlere relative Abweichungen der Jahresniederschlagshöhe in Anomaliejahren (1935 — 65).

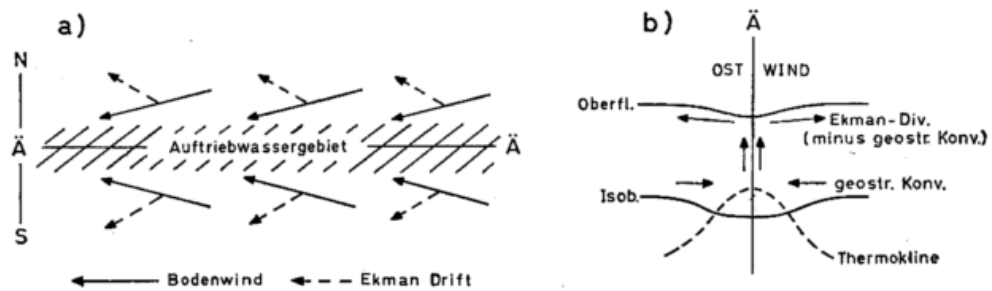


Abb. 2  
Zweiseitige Divergenz der Oberflächenströmung des Meeres am Äquator. a) Horizontalansicht, b) Vertikalschnitt nach J. Bjerknes (1966).

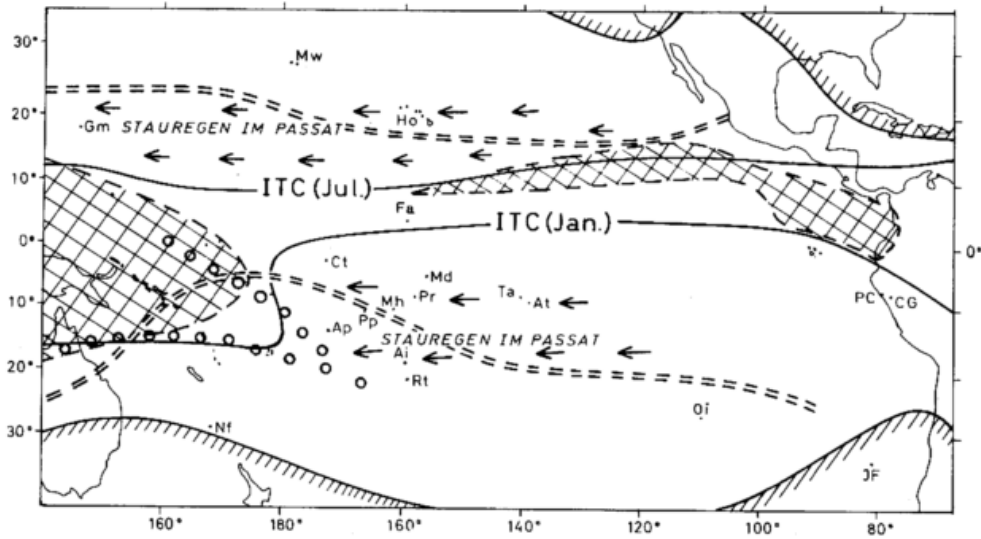


Abb. 3  
Verbreitung synoptischer und klimatischer Faktoren, die als Hauptniederschlagsursachen im äquatorialen Pazifik auftreten; Taifunbahnen vernachlässigt.

- XXXXXX = Äquatoriale Westwindzone
- +--- = easterly waves 000 Konvergenzlinien
- === = Äquatorialgrenze des häufigen Einflusses von Höhenträgen der Westdrift
- ||||| = Äquatorialgrenze ekstrop. Zyklonalregen.

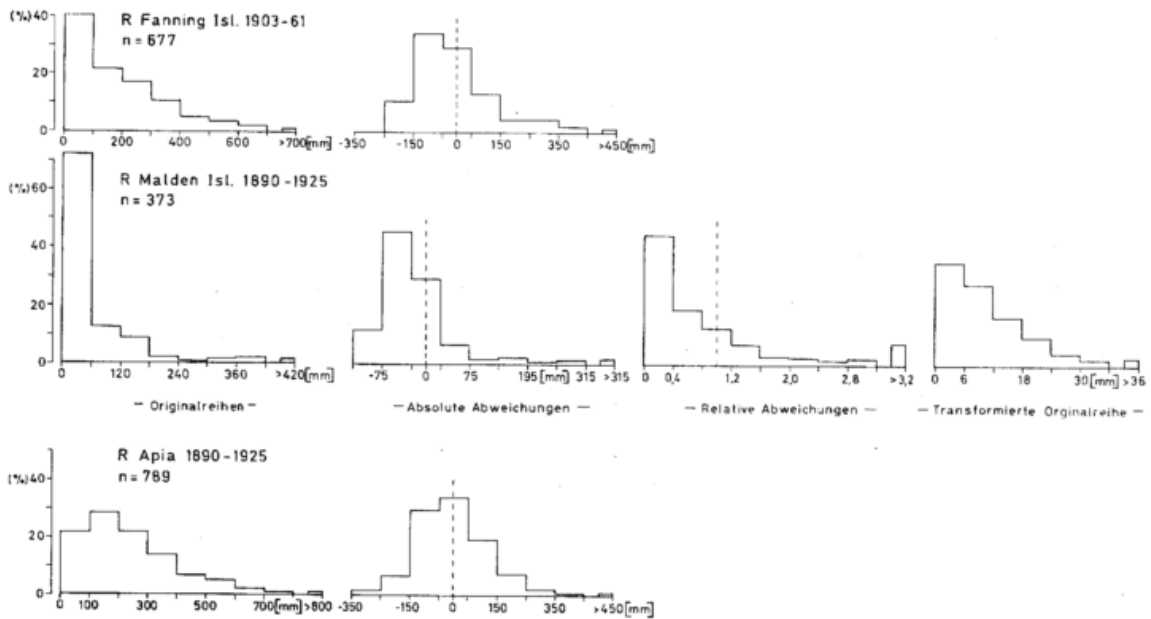


Abb. 4  
Häufigkeitsverteilungen der Monatssummen des Niederschlags ausgewählter Stationen.

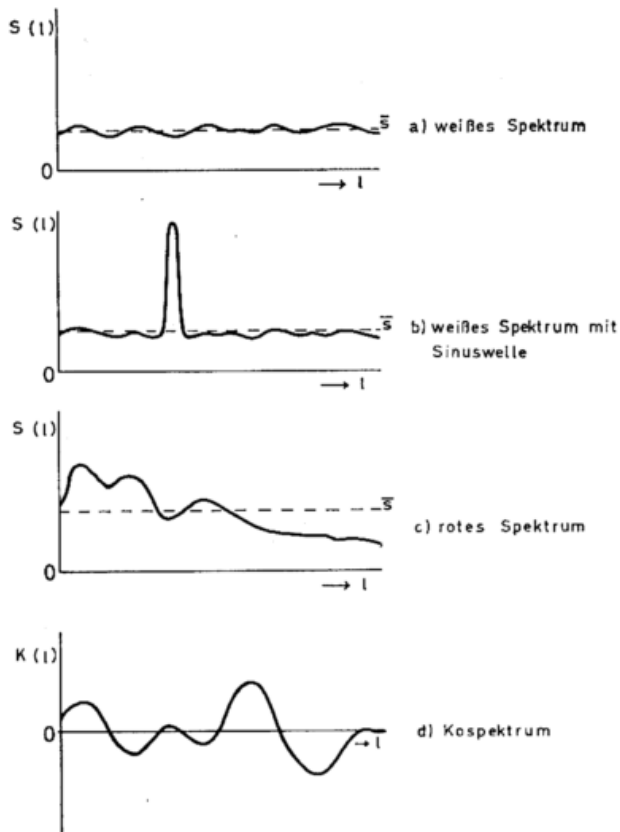


Abb. 5

Schematisierte Spektrumtypen.  $S(l)$  — Spektrumschätzwerte.

$\bar{S}$  — Mittelwert von  $S(l)$  = weißes Nullkontinuum,  
 $K(l)$  — Kospektrumschätzwerte,  $l$  — Harmonische.

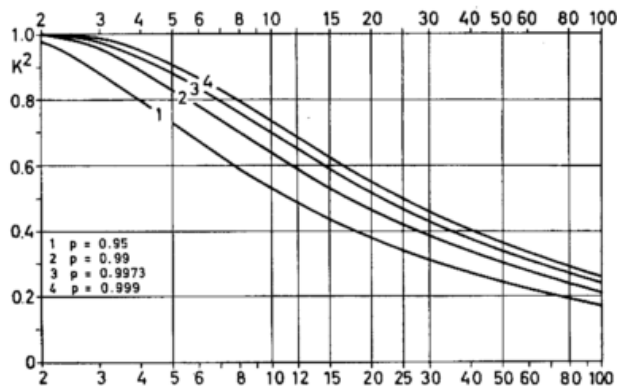


Abb. 7

Signifikanzgrenzen der Kohärenz  $K^2$ .

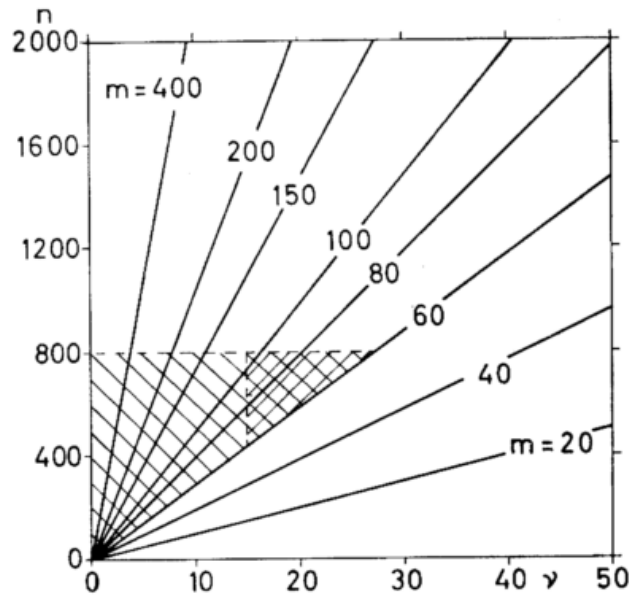


Abb. 6

Zusammenhang von Auflösungsvermögen und Stabilität der Spektren.  $n$  = Kollektivumfang,  $m$  = maximaler Zeitschritt,  $\nu$  = Zahl der Freiheitsgrade.

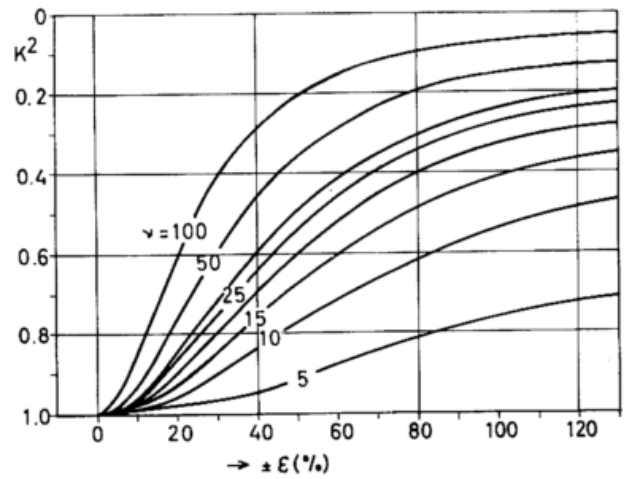


Abb. 8

Fehlerbereich der Phasendifferenz ( $p = 95\%$ ).

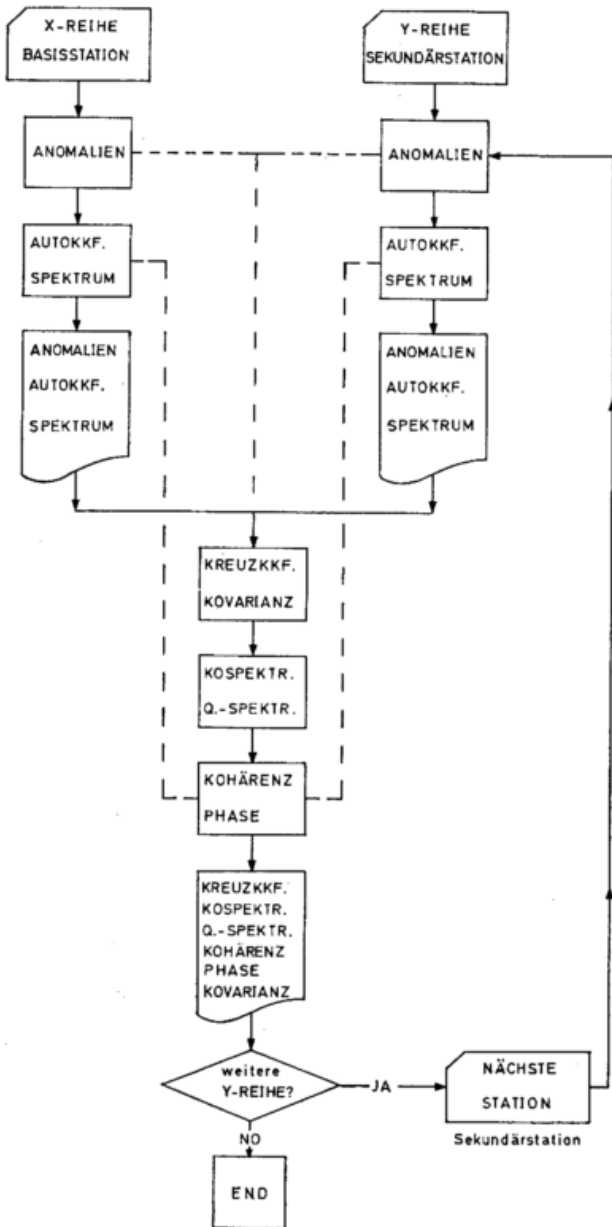


Abb. 9 Vereinfachtes Blockschema der Kohärenzanalyse.

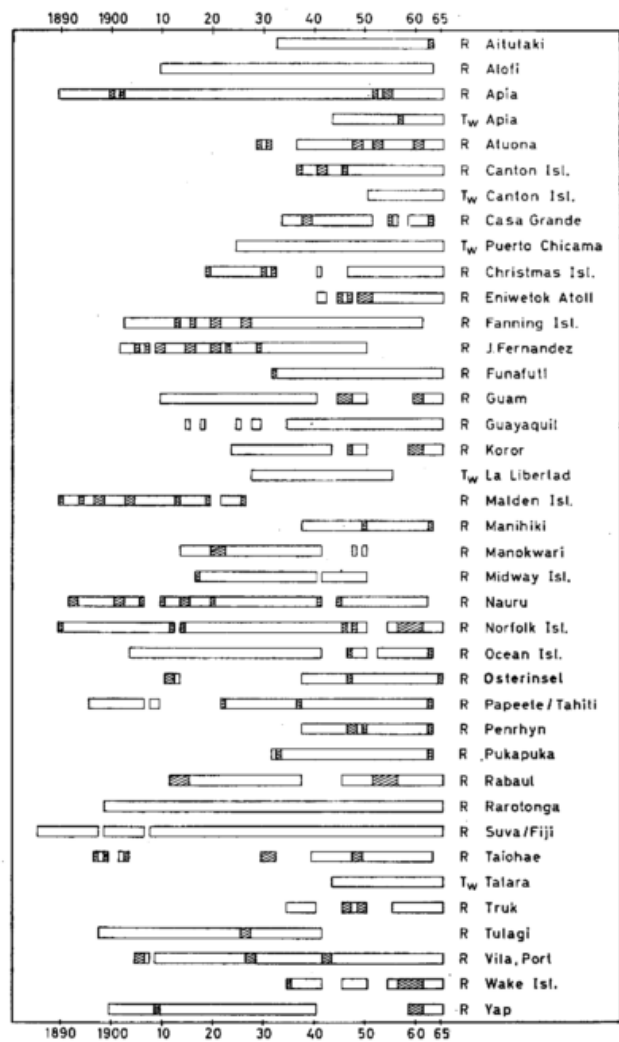


Abb. 10 Zeitliche Verteilung des Beobachtungsmaterials. Lückenhafte Reihen schattiert.

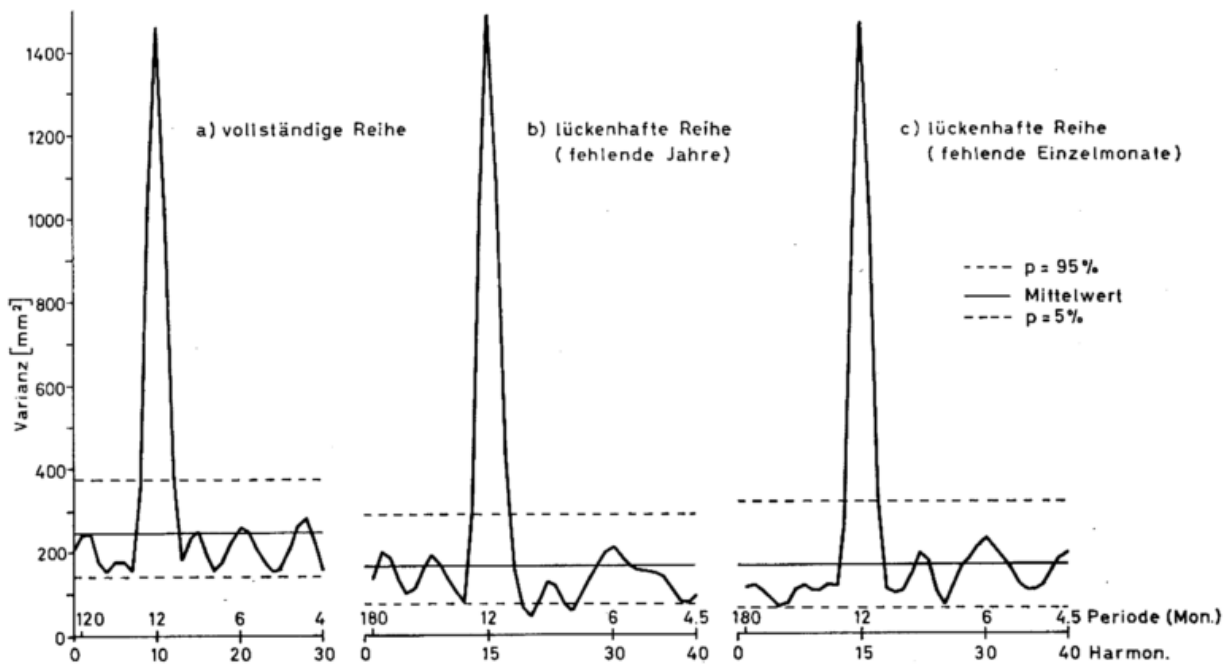


Abb. 11  
 Varianzspektren R Rarotonga 1899 — 1963 (Lückentest).  
 a)  $m = 60, \nu = 23.1$ ; b)  $m = 90, \nu = 12.2$ ; c)  $m = 90, \nu = 9.4$ .

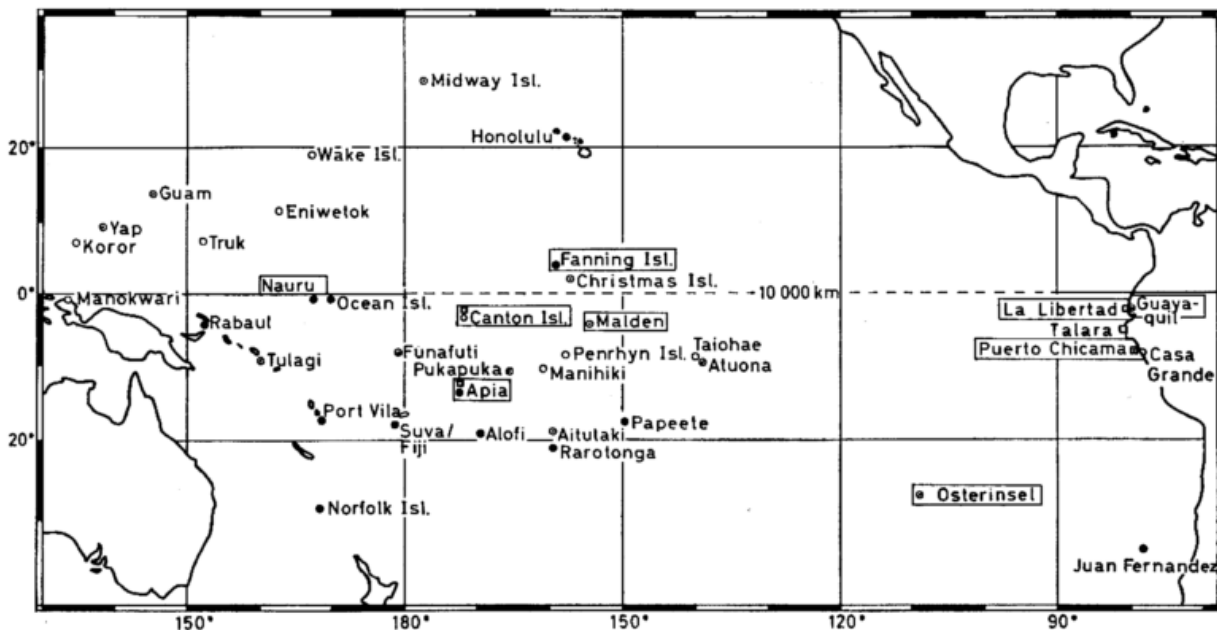


Abb. 12  
 Regionale Verteilung der Beobachtungsstationen.

- Erl:  Basisstation  
 $T_w$  R Beobachtungszeitraum  
 ● über 50 Jahre  
 ◻ 30—50 Jahre  
 ○ unter 30 Jahre

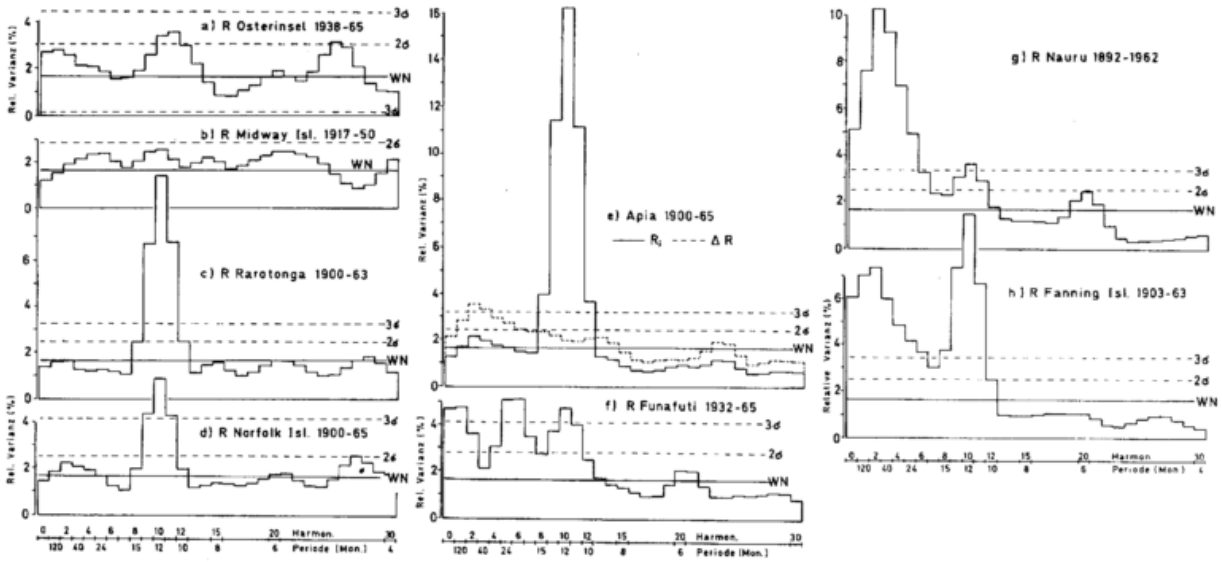


Abb. 13  
Beispiele verschiedener Spektrumtypen,  $m = 60$ ,  
WN = Weißes Nullkontinuum.

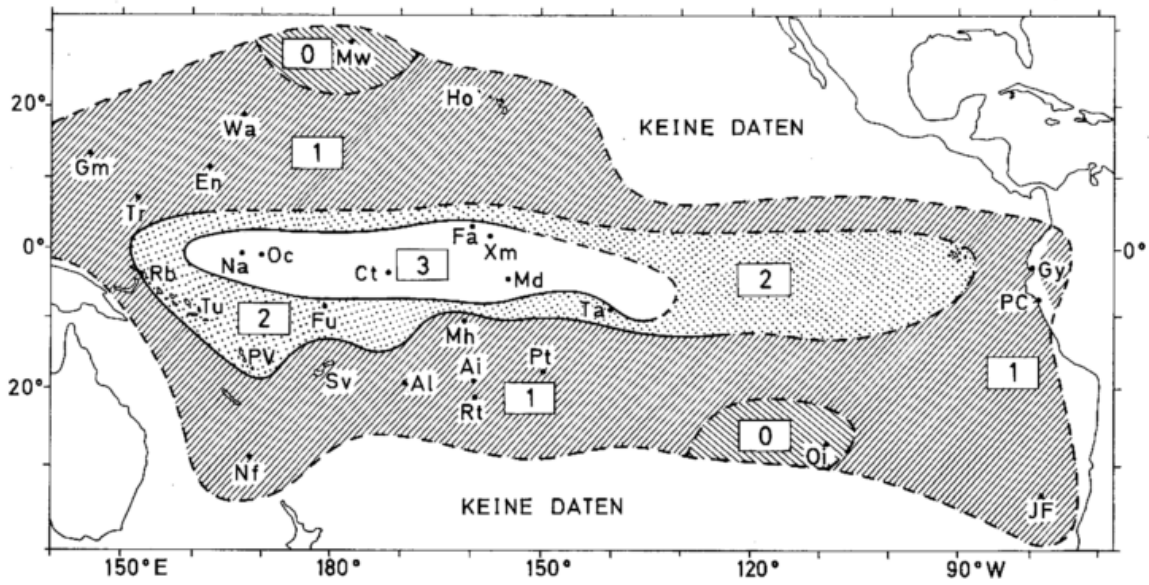


Abb. 14  
Regionale Verteilung der Spektrumtypen des Niederschlags.

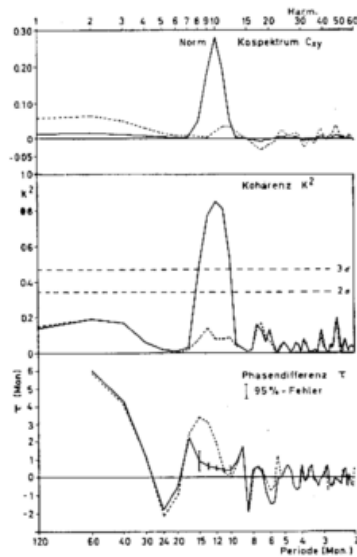


Abb. 15  
Kohärenzanalyse Apia — Rarotonga 1900 — 63,  $\nu = 24.9$ ,  
 $m = 60$ . ——— R, - - - -  $\Delta$  R.

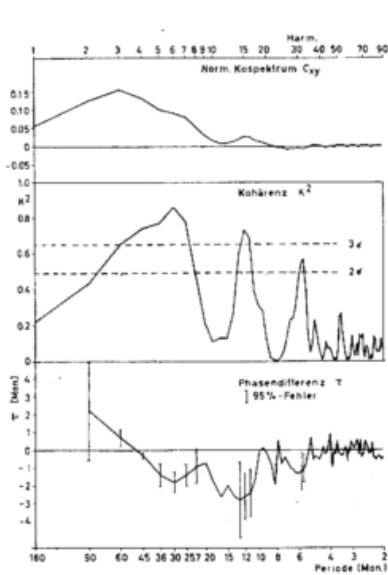


Abb. 16a  
Kohärenzanalyse R Fanning Isl. — R Nauru 1903 — 62.  
 $\nu = 11.8$ ,  $m = 90$ .

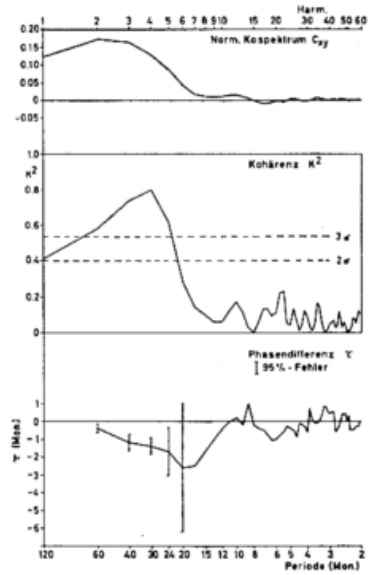


Abb. 16b  
Kohärenzanalyse  $\Delta$  R Fanning Isl. —  $\Delta$  R Nauru 1900 — 65.  
 $\nu = 18$ ,  $m = 60$ .

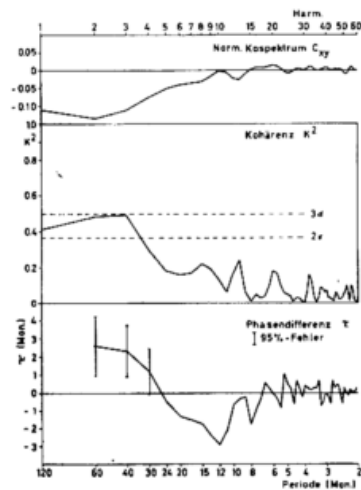


Abb. 17  
Kohärenzanalyse  $\Delta$  R Fanning Isl. —  $\Delta$  R Apia 1900 — 65,  
 $\nu = 22$ ,  $m = 60$ .

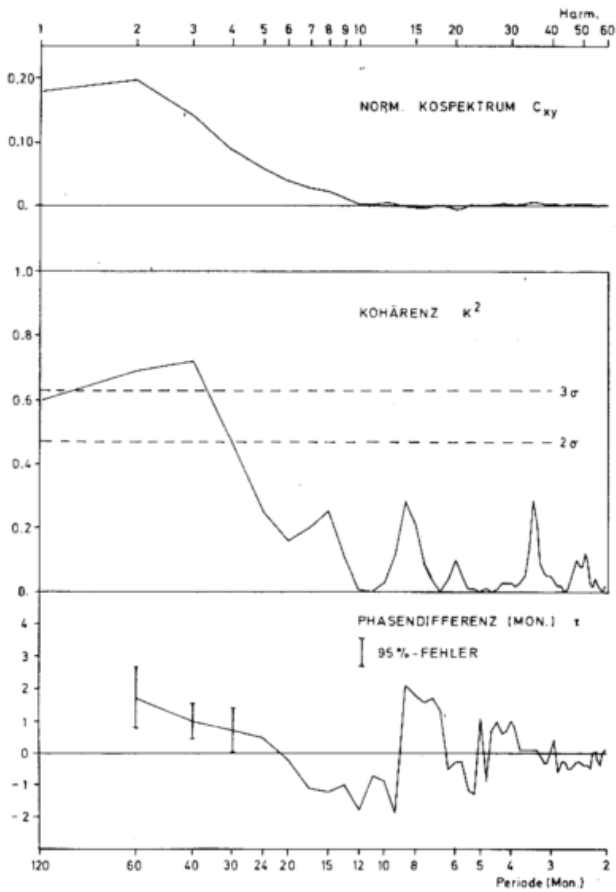


Abb. 18a

Kohärenzanalyse  $\Delta T_w$  Puerto Chicama —  $\Delta R$  Nauru 1925 — 65; Anomalien;  $\nu = 12.9$ ;  $m = 60$ .

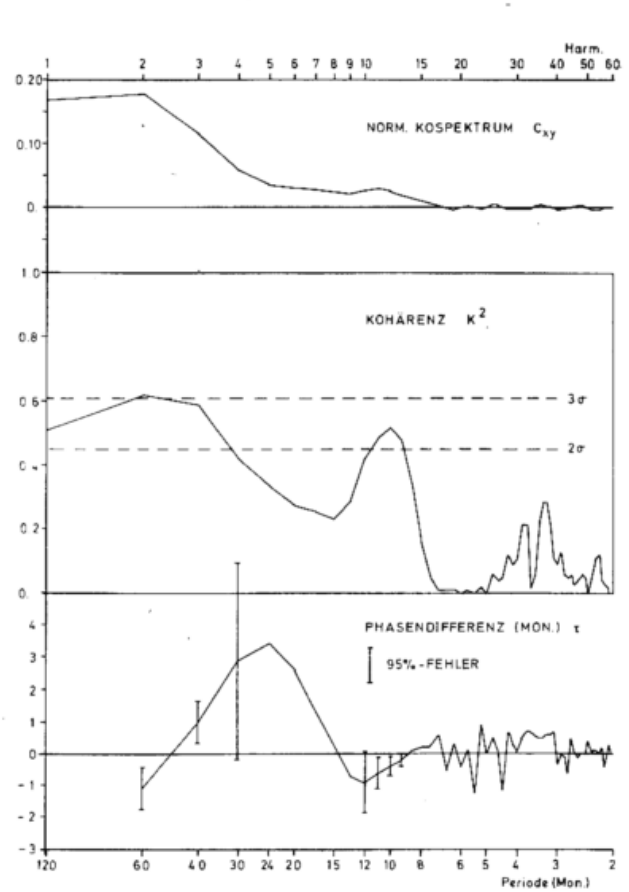


Abb. 18b

Kohärenzanalyse  $\Delta T_w$  Puerto Chicama —  $\Delta R$  Fanning Isl. 1925 — 65; Anomalien;  $\nu = 14.1$ ;  $m = 60$ .

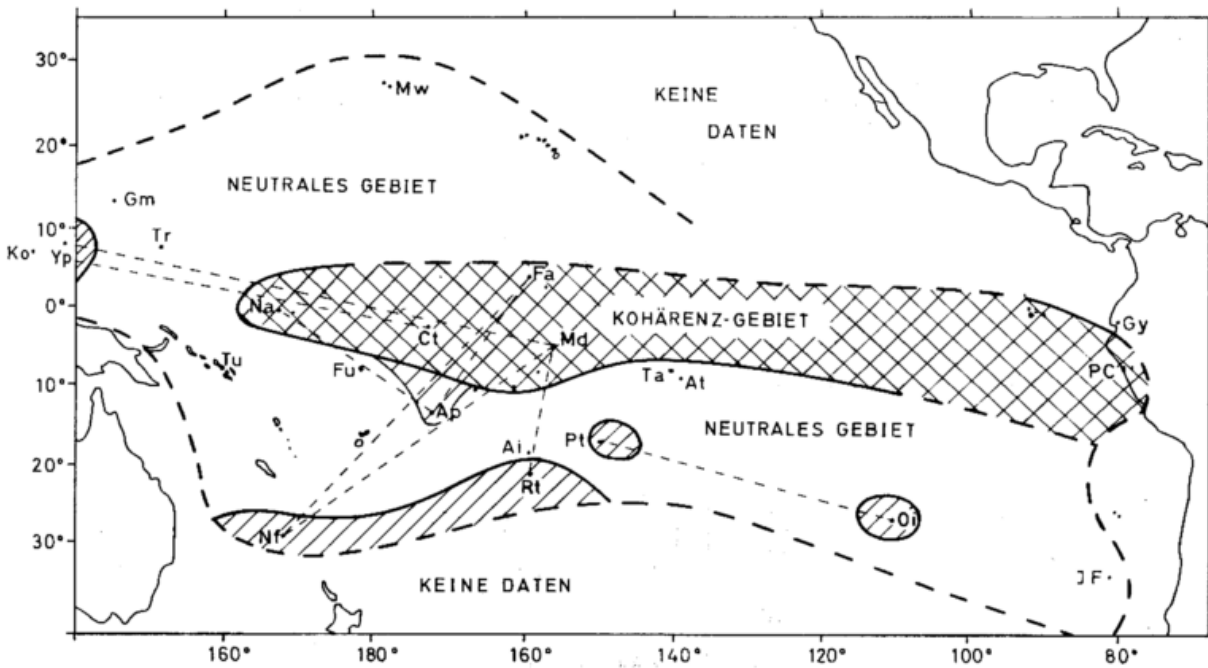


Abb. 19

Regionale Ausdehnung kohärenter Wechselwirkungen.

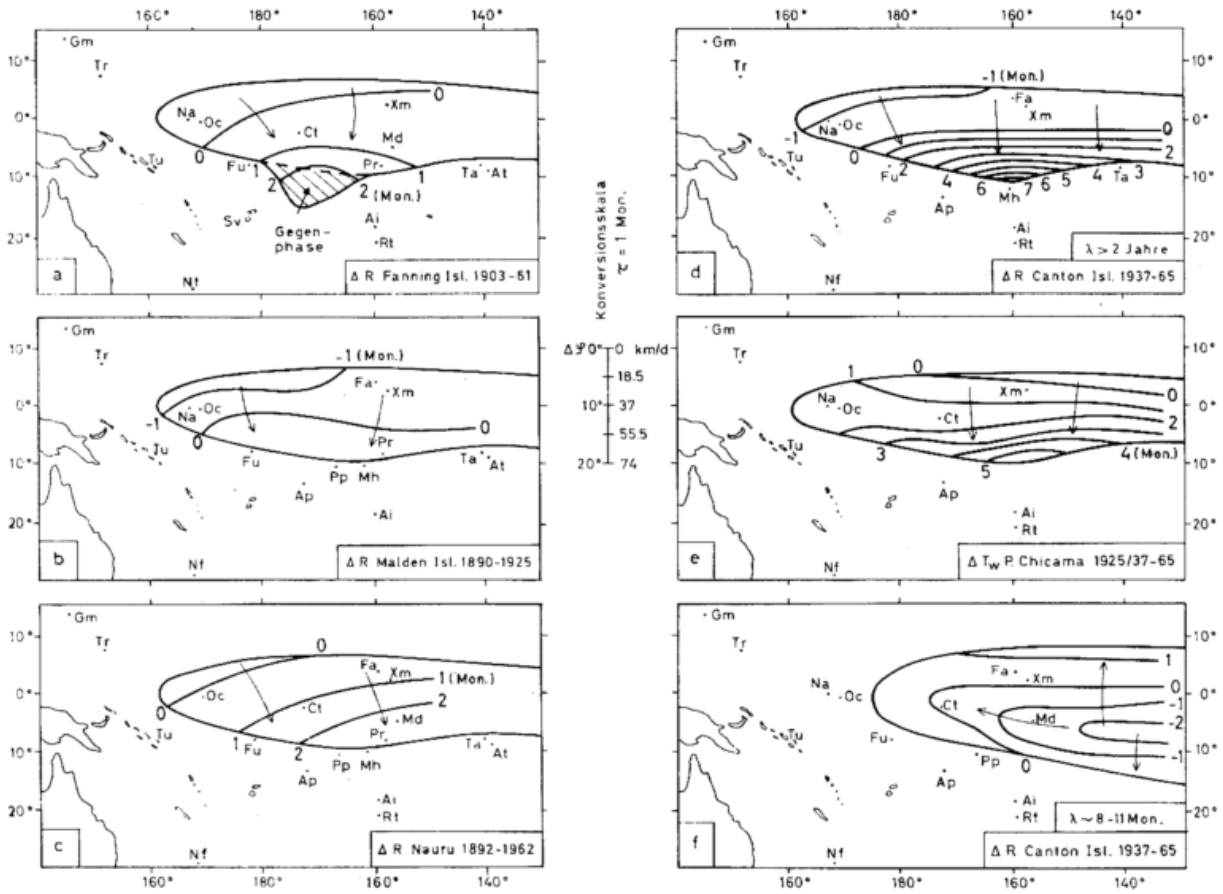


Abb. 20  
Phasendifferenzen im Kohärenzgebiet.

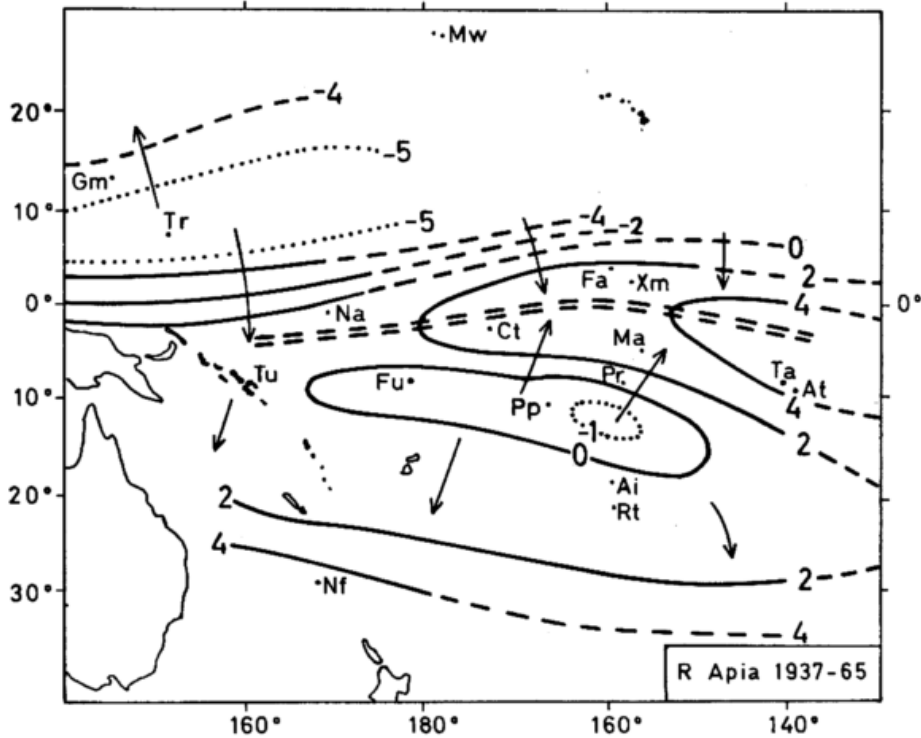


Abb. 21  
Mittlere Phasendifferenzen der Jahresperiode des Niederschlags  
in Monaten (Basisstation Apia).



Tab. 2

Monatssummen der Niederschlagshöhe (mm) und Monatsmittel der Wassertemperatur (°C) für einige Stationen des äquatorialen Pazifiks 1924—26.

Jahr	Monat	R Nauru	R Ocean Isl.	R Malden Isl.	R Fanning Isl.	R Guayaquil	T <sub>w</sub> Puerto Chicama
1924	J	435	780	—	344	—	—
	F	153	128	84	324	—	—
	M	159	108	46	226	—	—
	A	4	3	7	275	—	—
	M	60	128	30	77	—	—
	J	61	40	48	94	—	—
	J	83	60	41	58	—	—
	A	84	23	7	43	—	—
	S	30	75	5	11	—	—
	O	56	58	10	45	—	—
	N	0	3	1	10	—	—
	D	3	0	8	4	—	—
1925	J	50	13	4	11	343	18.4
	F	113	20	5	113	648	21.3
	M	8	33	70	121	538	26.8
	A	1	1	154	281	556	20.4
	M	7	33	153	392	220	19.4
	J	91	135	150	295	165	19.2
	J	108	98	26	143	19	18.7
	A	244	170	25	93	0	18.8
	S	179	63	4	83	0	17.8
	O	477	315	2	148	0	17.7
	N	131	120	6	126	13	17.6
	D	482	—	28	425	89	20.6
1926	J	508	305	141	558	—	21.7
	F	254	363	114	482	—	21.7
	M	633	503	—	—	—	22.8
	A	668	443	—	—	—	18.6
	M	173	395	—	374	—	17.1
	J	276	175	—	248	—	18.4
	J	88	95	—	199	—	18.3
	A	161	175	—	215	—	17.2
	S	76	58	—	22	—	16.9
	O	25	10	—	67	—	16.5
	N	195	100	—	—	—	16.7
	D	32	50	—	1	—	16.5

R — Niederschlag, T<sub>w</sub> — Wassertemperatur

Tab. 3  
Stationsverzeichnis mit Spektrumtypen und Quellennachweis

Lfd. Nr.	Station	Kurzform	WMO Kennzahl	Koordinaten		Höhe m	Art der Beob.	Zeitraum	Spektrum rel. Med. Typ Anomalie-spektrum		Quellennachweis
				Breite °	Länge °						
1	Aitutaki	Ai	91830	18 53 S	159 46 W	3	R <sup>1)</sup>	1932-1963	1	0.43	1932-62(1)
2	Alofi	Al	822	19 02	169 55	30	R	1921-1963	1	0.45	1921-50(2), 1951-63(1)
3	Apia	Ap	762	13 48	171 47	2	R	1890-1965	2	0.40	1890-1920(2), 1921-30(1), 1931-50(2), 1951-54(1), 1955-65(3)
4	Apia	Ap	762			0	T <sub>w</sub> <sup>1)</sup>	1944-1965	3	0.05	1944-65(11)
5	Atuona	At	925	09 48	139 02	4	R	1937-1965	3	0.28	1937-54(1), 1955-65(3), Z 1929-31(4)
6	Canton Isl.	Ct	700	02 46	171 43	3	R	1937-1965	3	0.11	1937-65(12)
7	Canton Isl.		700			0	T <sub>w</sub>	1950-1965	3	0.05	1950-65(17)
8	Casa Grande	CG	84482	07 45	79 12	158	R	1934-1963	1	0.58	1934-37(16), 1938-63(8)
9	Christmas Isl.	Xm	91489	02 00 N	157 24	3	R	1919-1965	—	—	1919(13), 1920-23(2), 1931-50(2), 1951-65(13)
10	Eniwetok Atoll	En	250	11 20	162 20 E	3	R	1941-1965	1	0.45	1941-65(12)
11	Fanning Isl.	Fa	487	03 51	159 22 W	5	R	1903-1961	3	0.12	1903-30(4), 1931-50(2), 1951-61(1)
12	Juan Fernandez	JF	85585	33 37 S	78 52	6	R	1902-1950	1	0.40	1902-50(2)
13	Funafuti	Fu	91643	08 31	179 12 E	2	R	1932-1965	2	0.25	1932-50(2), 1951-54(1), 1955-65(3)
14	Guam	Gm	217	13 24 N	144 38	19	R	1910-1965	1	0.48	1910-20(10), 1921-50(2), 1955-65(3)
15	Guayaquil	Gy	84129	02 12 S	79 53 W	6	R	1935-1965	1	0.28	1935-62(1), 1963-65(3)
16	Honolulu	Ho	91182	21 20 N	157 56	5	R	1874-1950	1	0.45	1874-1950(2)
17	Koror	Ko	408	07 20 N	134 29 E	33	R	1924-1965	1	0.41	1924-50(2), 1955-65(3)
18	La Libertad	Li	—	02 14 S	80 55 W	0	T <sub>w</sub>	1928-1955	3	0.13	1928-55(5)
19	Malden Isl.	Md	91902	04 02	155 00	5	R	1890-1925	3	0.15	1890-1919(2, 9), 1920-25(10)
20	Manihiki	Mh	808	10 24	161 03	4	R	1938-1963	1	0.40	1938-63(1)
21	Manokwari	Mk	97530	00 53	134 03 E	19	R	1914-1950	1	0.50	1914-30(10), 1931-50(2)
22	Midway Isl.	Mw	91066	28 13 N	177 22 W	13	R	1917-1950	0	0.42	1917-20(10), 1921-50(2)
23	Nauru	Na	530	00 32 S	166 55 E	37	R	1892-1962	3	0.10	1892-1962(1)
24	Norfolk Isl.	Nf	94996	29 03	167 56	110	R	1890-1965	1	0.47	1890-1950(2), 1955-65(3)
25	Ocean Isl.	Oc	91533	00 52	169 35	27	R	1904-1963	3	0.08	1904-20(1), 1921-50(2), 1951-63(1)
26	Osterinsel	Oi	85469	27 10	109 26 W	30	R	1938-1965	0	0.42	1938-65(7)
27	Papeete/Tahiti	Pt	91938	17 32	149 34	1	R	1879-1963	1	0.55	1879-1909(9), 1922-34(1), 1935-50(2), 1951-54(1), 1955-65(3)
28	Penrhyn Isl.	Pr	800	09 01	158 04	2	R	1938-1963	3	0.20	1938-63(1)
29	Port Vila	PV	558	17 44	168 19 E	57	R	1905-1965	1/2	0.45	1905-65(6)
30	Puerto Chicama	PC	84481	07 41	79 26 W	0	T <sub>w</sub>	1925-1965	3	0.07	1925-56(5), 1957-63(15), 1964-65(18)
31	Pukapuka	Pp	91811	10 53	165 49	3	R	1932-1963	1	0.48	1932-63(1)
32	Rabaul	Rb	94085	04 13	152 11 E	6	R	1912-1965	1	0.48	1912-65(13)
33	Rarotonga	Rt	91843	21 12	159 46 W	4	R	1899-1965	1	0.48	1899-1950(2), 1951-54(1), 1955-65(3)
34	Suva/Fiji	Sv	690	18 09	178 27 E	9	R	1886-1965	1	0.48	1886-1916(9), 1917-30(4), 1931-50(2), 1951-65(1, 3)
35	Taiohae	Ta	920	08 56	140 05 W	18	R	1940-1963	2	0.28	1940-63(1), Z 1897-1903 u. 1930-32(4)
36	Talara	Tl	84390	04 34	81 15	0	T <sub>w</sub>	1944-1965	3	0.12	1944-65(17)
37	Truk	Tr	91334	07 27 N	151 50 E	2	R	1935-1965	1	0.40	1935-50(2), 1951-54(1), 1955-65(3)
38	Tulagi	Tu	517	09 05 S	160 08	(58)	R	1898-1941	2	0.33	1898-1918(9), 1909-40(2), 1941(1)
39	Wake Isl.	Wa	245	19 17 N	166 39	4	R	1935-1965	1	0.37	1935-50(2), 1955-65(3)
40	Yap Isl.	Yp	413	09 31	138 08	17	R	1900-1965	1	0.40	1900-50(2), 1955-65(3)

Z weist auf zusätzliche Daten hin, die nicht in die Kohärenzanalyse einbezogen wurden.

1) R — Niederschlag, T<sub>w</sub> — Wassertemperatur der Meeresoberfläche.

Tab. 4

Überblick über die durchgeführten Kohärenzanalysen  
R — Niederschlag, T<sub>w</sub> — Wassertemperatur

WMO Kennzahl	Basisstation		R Apia	R Canton Is.	R Fanning Is.	R Guayaquil	T <sub>w</sub> La Libertad	R Malden Is.	R Nauru	R Osterinsel	T <sub>w</sub> Puerto Chicama
	Sekundärstation										
91830	R	Aitutaki	x	x							x
822	R	Alofi	x	x							x
762	R	Apia		x	x	x	x	x			x
762	T <sub>w</sub>	Apia									x
925	R	Atuona	x	x		x				x	x
700	R	Canton Isl.	x		x				x	x	x
700	T <sub>w</sub>	Canton Isl.		x							x
84482	R	Casa Grande	x	x							x
91489	R	Christmas Isl.	x	x			x				x
250	R	Eniwetok Atoll	x	x	x	x					x
487	R	Fanning Isl.	x	x		x	x	x	x	x	x
85585	R	Juan Fernandez	x					x			x
91643	R	Funafuti	x	x							x
217	R	Guam	x	x	x						x
84129	R	Guayaquil	x	x			x			x	x
91182	R	Honolulu						x			
408	R	Koror	x	x							
—	T <sub>w</sub>	La Libertad	x		x				x		
91902	R	Malden Isl.	x		x				x		
808	R	Manihiki	x	x							x
97530	R	Manokwari			x						
91066	R	Midway Isl.			x						
530	R	Nauru	x	x	x	x	x	x		x	x
94996	R	Norfolk Isl.	x	x	x			x		x	x
91533	R	Ocean Isl.	x	x	x			x	x		x
85469	R	Osterinsel	x	x	x				x		x
91938	R	Papeete/Tahiti	x	x	x		x			x	x
800	R	Penrhyn Isl.	x	x		x					x
558	R	Port Vila	x	x	x			x			x
84481	T <sub>w</sub>	Puerto Chicama		x	x	x	x			x	
91811	R	Pukapuka	x	x							x
94085	R	Rabaul	x	x			x				x
91843	R	Rarotonga	x	x	x	x		x			x
690	R	Suva/Fiji	x	x				x			x
920	R	Taiohae	x	x							x
84390	T <sub>w</sub>	Talara				x					x
91334	R	Truk	x	x							
517	R	Tulagi	x					x			
245	R	Wake Isl.	x	x		x					
413	R	Yap Isl.						x			

Tab. 5  
Klassifikation klimatologischer Spektra ( $\Delta t \geq 1$  Monat)

Relativer Spektrummedian	$\geq 0.16$			$< 0.16$
Im Periodenbereich $> 1$ Jahr zeigt das Anomaliespektrum Spektrumschätzwerte	$< 3\sigma$		$\geq 3\sigma$	
Periodenbereich = 1 Jahr	$< 3\sigma$	$\geq 3\sigma$	$\geq 3\sigma$	$< 3\sigma$
Spektrumtyp	0	1	2	3
Grundcharakter des Spektrums	weiß		gemischt	rot
Bezeichnung des Spektrums	Zufallspektrum	weißes Spektrum	Mischspektrum	rotes Spektrum

Tab. 6  
Kohärenzbereiche ausgewählter Stationen mit R Fanning Isl., Jahresgang nicht eliminiert

Basisstation	Zeitraum	Harmonische															Sekundärstation
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
R Fanning Isl.	1903—61	30	20	03	05	16	12	02	23	<u>54</u>	<u>62</u>	<u>56</u>	28	05	10	13	R Papeete R Rarotonga R Norfolk Isl. R Midway Isl. R Guam
		26	29	27	22	19	19	18	28	<u>56</u>	<u>60</u>	<u>48</u>	19	03	05	02	
		33	<u>39</u>	<u>42</u>	34	17	05	00	08	<u>32</u>	<u>42</u>	34	06	14	09	09	
	1914—50	13	19	18	17	16	11	04	11	31	42	31	08	00	06	13	
		01	01	06	18	36	41	24	22	<u>55</u>	<u>67</u>	<u>65</u>	43	11	10	17	
		120	60	40	30	24	20	17	15	13	12	11	10	9	8.6	8.0	
Periode (Monate)																	

Erläuterung: Einfache Unterstreichung kennzeichnet Signifikanz von  $2\sigma$ , doppelte von  $3\sigma$ .  $K^2$  in Hundertsteln.

Tab. 7

Kohärenz  $K^2$  (in 0.01) von Anomalierreihen verschiedener Basisstationen; Puerto Chicama und La Libertad Wassertemperatur, sonst Niederschlag;  $m = 60$ ,  $C_s =$  Kovarianzanteil signifikanter Periodenbereiche in Prozent, Signifikanzgrenze  $2\sigma$ —,  $3\sigma$ —.

Nr.	Basisstation	Zeit- raum	Periode (Monate)										$C_s$	Sekundärstation
			120	60	40	30	24	20	17.1	15	13.3	12		
1	Apia	1900—1965	41	48	49	30	18	16	17	22	19	13	33	Fanning Isl.
2		1890—1965	41	44	38	30	25	22	15	10	05	02	39	Nauru
3		1900—1965	11	14	12	03	00	03	04	04	02	02	—	Norfolk
4			02	01	01	02	07	07	03	02	01	02	—	Papeete
5			15	19	17	06	02	00	02	08	14	08	—	Rarotonga
6			28	18	09	04	06	13	15	07	02	00	—	Suva/Fiji
7		1890—1925	24	28	29	18	06	01	01	05	13	08	—	Malden Isl.
8		1937—1965	51	50	38	12	06	12	16	05	00	01	—	Canton Isl.
9	Fanning Isl.	1903—1961	41	48	49	30	18	16	17	22	19	13	33	Apia
10			41	58	74	80	62	28	14	10	06	06	67	Nauru
11			67	70	72	74	58	27	11	09	08	07	66	Ocean Isl.
12			30	29	13	02	01	00	00	01	03	02	—	Port Vila
13		1900—1925	65	72	75	69	44	24	15	11	04	01	54	Malden Isl.
14		1935—1961	99	98	81	47	37	47	57	49	29	14	51	Canton Isl.
15			41	25	14	20	26	09	03	24	44	25	—	Guayaquil
16			44	43	10	11	52	29	08	07	06	07	—	Osterinsel
17	Malden Island	1890—1925	24	28	29	18	06	01	01	05	13	08	—	Apia
18			03	18	37	36	20	10	09	02	00	04	—	Honolulu
19			40	55	74	72	34	10	16	09	02	06	32	Nauru
20			42	36	39	51	28	00	02	00	01	02	10	Norfolk
21			03	07	17	12	05	00	02	00	07	13	—	Suva/Fiji
22		1900—1925	65	72	75	69	44	24	15	11	04	01	54	Fanning Isl.
23			10	22	25	12	03	01	13	19	06	01	—	Juan Fernandez
24			56	71	85	85	60	16	02	04	15	44	50	Nauru
25			81	79	78	68	40	08	01	03	17	18	63	Ocean Island
26			67	67	24	00	04	13	46	31	02	00	—	Port Vila
27			51	57	52	39	30	28	29	18	05	02	13	Rarotonga
28			51	46	34	27	13	01	07	11	06	13	—	Tulagi
29			72	63	52	49	25	07	04	04	01	06	21	Yap
30	Nauru	1892—1925	40	55	74	72	34	10	16	09	02	06	32	Malden Isl.
31		1890—1965	41	44	38	30	25	22	15	10	05	02	39	Apia
32		1937—1962	27	19	06	22	28	16	24	40	20	08	—	Osterinsel
33			64	64	59	40	25	15	07	12	14	16	39	Canton Isl.
34	Canton Isl.	1937—1965	51	50	38	12	06	12	16	05	00	01	—	Apia
35			50	49	33	16	12	16	33	50	42	36	—	Atuona
36			71	53	26	20	24	16	07	02	05	13	9	Casa Grande
37			06	20	39	55	78	84	60	27	07	06	18	Christmas Isl.
38	Canton Isl.	1937—1965	03	01	09	27	20	03	11	28	32	30	—	Eniwetok Atoll
39			24	17	14	12	11	06	11	21	15	08	—	Funafuti
40			34	22	11	08	17	07	02	23	32	18	—	Guayaquil
41			07	02	00	04	00	03	09	06	08	11	—	Guam
42			97	65	47	24	01	18	11	14	09	22	7	Koror
43			49	49	43	32	28	10	08	50	60	52	—	Norfolk Isl.
44			43	30	02	06	05	02	03	04	10	18	—	Osterinsel
45			08	04	00	17	39	27	26	29	42	35	—	Rabaul
46			31	36	32	12	02	00	08	32	34	18	—	Rarotonga
47			09	04	11	07	04	08	01	18	16	05	—	Suva/Fiji
48			18	09	02	03	16	26	15	03	02	06	—	Truk
49			22	27	18	04	01	08	15	09	03	09	—	Port Vila
50			00	01	00	10	21	06	10	05	26	47	—	Wake Isl.
51	Canton Isl.	1937—1963	43	47	40	28	23	08	04	03	03	02	—	Aitutaki
52			22	16	09	05	02	16	11	00	09	04	—	Alofi

(Fortsetzung auf Seite A 17)

Nr.	Basis-station	Zeit-raum	Periode (Monate)											Sekundärstation
			120	60	40	30	24	20	17.1	15	13.3	12	C <sub>s</sub>	
53			99	98	81	47	37	47	57	49	29	14	51	Fanning Isl.
54			82	84	56	17	14	02	03	06	15	39	38	Manihiki
55			64	64	59	40	25	45	07	12	14	16	39	Nauru
56			90	82	78	66	50	47	20	27	29	14	63	Ocean Isl.
57			36	23	05	00	02	01	01	04	28	41	—	Papeete
58	Canton Isl.	1937—1963	88	86	69	31	05	03	20	30	36	36	49	Penrhyn
59			42	42	24	04	04	05	04	02	01	05	—	Pukapuka
60			38	30	13	04	03	04	13	20	16	29	—	Taiohae
61	Guayaquil	1935—1965	14	09	05	12	18	16	20	24	11	03	—	Apia
62			22	16	16	14	11	04	09	28	25	06	—	Atuona
63			34	22	11	08	17	07	02	23	32	18	—	Canton Isl.
64			11	26	28	12	16	07	01	00	05	05	—	Eniwetok Atoll
65			41	25	14	20	26	09	03	24	44	25	—	Fanning Island
66			47	38	21	11	12	09	01	00	01	03	—	Nauru
67			18	09	01	09	20	15	17	10	01	14	—	Osterinsel
68			27	19	12	22	46	46	16	14	28	47	—	Penrhyn
69			15	17	18	30	36	26	20	40	48	29	—	Rarotonga
70			16	18	11	09	10	00	27	36	13	09	—	Wake
71	Osterinsel	1938—1965	47	39	09	08	05	01	01	00	02	07	—	Atuona
72			43	30	02	06	05	02	03	04	10	18	—	Canton Island
73			44	43	10	11	52	29	08	07	06	06	—	Fanning Island
74			18	09	01	09	20	15	17	10	01	14	—	Guayaquil
75			27	19	06	22	28	16	24	40	20	08	—	Nauru
76			17	13	08	14	21	14	02	06	17	20	—	Norfolk
77			14	16	20	24	26	15	11	52	67	34	4	Papeete
78	Puerto Chicama	1925—1965	30	28	24	17	09	06	08	16	25	17	—	Alofi
79			25	40	39	14	08	07	06	04	00	00	—	Apia
80			27	25	09	03	12	21	15	06	02	06	—	Christmas Isl.
81			51	62	59	42	33	27	27	23	28	42	46	Fanning Isl.
82			72	56	39	36	47	44	17	03	08	34	30	Guayaquil
83			60	69	72	47	25	16	20	25	11	01	61	Nauru
84			26	26	27	22	17	18	08	00	00	00	—	Norfolk Isl.
85			72	80	75	43	30	29	24	24	11	06	54	Ocean Isl.
86			00	01	03	11	16	10	05	10	06	03	—	Papeete
87			30	19	07	03	02	00	01	04	08	05	—	Port Vila
88			03	05	04	03	04	02	01	08	08	04	—	Rabaul
89			25	25	26	20	17	16	09	01	04	08	—	Rarotonga
90			19	19	13	02	02	08	05	03	07	01	—	Suva/Fiji
91		1937—1965	48	40	29	21	17	14	08	03	02	04	—	Aitutaki
92			44	43	43	27	16	08	04	03	13	18	—	Atuona
93			72	67	57	44	44	40	17	03	02	05	46	Canton Isl.
94			08	12	16	11	08	11	17	20	10	05	—	Eniwetok Atoll
95			13	14	17	21	28	20	06	02	09	33	—	Funafuti
96			58	45	27	33	52	48	18	03	05	27	19	Guayaquil
97	Puerto Chicama	1937—1965	69	72	46	13	11	06	06	16	13	05	28	Manihiki
98			66	65	54	36	19	11	08	01	01	17	45	Penrhyn
99			72	68	32	03	07	03	02	10	18	24	31	Pukapuka
100			21	21	20	18	09	01	04	21	19	12	—	Taiohae
101	La Libertad	1928—1955	09	06	06	04	07	08	04	01	03	09	—	Apia
102			18	57	88	65	32	29	38	12	08	17	1	Christmas Isl.
103			11	05	04	11	24	32	14	19	29	11	—	Fanning Isl.
104			00	03	22	47	42	29	15	07	18	22	—	Guayaquil
105			15	09	14	27	25	17	18	22	22	16	—	Nauru
106			14	10	04	02	02	02	04	05	08	14	—	Papeete
107			09	01	01	07	34	55	05	04	09	02	—	Rabaul
108	Puerto Chicama	1928—1955	07	04	14	49	57	40	10	04	21	35	15	T <sub>w</sub> La Libertad
109		1944—1965	14	12	06	17	12	03	08	08	10	03	—	T <sub>w</sub> Apia
110			46	56	64	71	78	73	51	39	32	28	38	T <sub>w</sub> Talara

Tab. 8

Kohärenz  $K^2$  (in 0.01) verschiedener Originalreihen,  $m = 60$ ;  $T_w$  = Wassertemperatur, sonst Niederschlag

Nr.	Basis-station	Zeit-raum	Periode (Monate)															Harm. Harm.		Sekundär-station
			120	60	40	30	24	20	17.1	15	13.3	12	10.9	10	9.2	8.6	8	1—7	8—13	
1	Apia	1900—1965	10	15	14	04	00	05	07	28	<u>62</u>	<u>74</u>	<u>67</u>	28	15	02	00	—	58	Norfolk
2			01	01	02	02	07	08	05	40	<u>76</u>	<u>82</u>	<u>74</u>	40	04	04	06	—	83	Papeete
3			11	13	06	04	03	05	03	<u>46</u>	<u>82</u>	<u>86</u>	<u>76</u>	34	12	08	07	—	71	Port Vila
4			14	19	17	06	02	01	03	<u>45</u>	<u>77</u>	<u>85</u>	<u>81</u>	<u>54</u>	05	03	01	—	76	Rarotonga
5			29	19	11	05	06	14	17	<u>37</u>	<u>65</u>	<u>73</u>	<u>64</u>	28	01	02	03	—	61	Suva/Fiji
6	Fanning Isl.	1903—1961	33	39	<u>42</u>	34	17	05	00	08	32	<u>42</u>	34	06	14	09	09	10	12	Norfolk
7			30	20	03	05	16	12	02	23	<u>54</u>	<u>62</u>	<u>56</u>	28	05	10	13	—	5	Papeete
8			26	29	27	22	19	19	18	28	<u>56</u>	<u>60</u>	<u>48</u>	19	03	05	02	—	28	Rarotonga
9		1914—1950	01	01	06	18	36	41	24	22	<u>55</u>	<u>67</u>	<u>65</u>	43	11	10	17	—	58	Guam
10			12	15	23	17	02	04	09	04	<u>42</u>	<u>70</u>	<u>80</u>	<u>62</u>	32	21	23	—	33	Manokwari
11			13	19	18	17	16	11	04	11	31	<u>42</u>	31	08	00	06	13	—	—	Midway Isl.
12	Nauru	1890—1925	<u>40</u>	<u>43</u>	<u>37</u>	30	25	22	16	03	<u>38</u>	<u>56</u>	<u>44</u>	09	01	01	04	23	39	Apia
13		1935—1965	<u>48</u>	<u>39</u>	<u>21</u>	10	10	06	01	26	<u>56</u>	<u>59</u>	50	33	07	03	02	—	37	Guayaquil
14		1892—1925	39	48	<u>64</u>	<u>65</u>	34	06	09	18	31	37	17	05	<u>59</u>	47	13	31	<1	Malden
15	Guayaquil	1935—1965	23	17	15	13	11	06	13	10	47	<u>67</u>	<u>58</u>	15	00	11	21	—	7	Atuona
16			10	26	39	23	12	02	03	34	<u>76</u>	<u>86</u>	<u>77</u>	36	10	14	16	—	73	Eniwetok
17			41	24	12	18	23	07	02	15	<u>63</u>	<u>79</u>	<u>75</u>	47	10	04	00	—	52	Fanning Isl.
18			48	39	21	10	10	06	01	26	<u>56</u>	<u>59</u>	50	33	07	03	02	—	37	Nauru
19			28	21	13	22	48	45	12	01	08	19	22	09	03	10	12	—	—	Penrhyn
20			05	06	13	12	05	04	41	<u>63</u>	<u>87</u>	<u>90</u>	<u>79</u>	40	00	03	16	—	70	Wake
21	$T_w$ Puerto Chicama	1934—1963	10	09	04	12	27	14	10	<u>61</u>	<u>77</u>	<u>77</u>	<u>66</u>	28	07	02	32	—	56	Casa Grande
22		1925—1962	<u>49</u>	<u>59</u>	<u>57</u>	44	38	31	30	<u>58</u>	<u>80</u>	<u>85</u>	<u>82</u>	<u>66</u>	44	40	18	10	53	Fanning Isl.
23		1935—1965	<u>53</u>	40	23	29	<u>52</u>	<u>51</u>	25	<u>58</u>	<u>85</u>	<u>91</u>	<u>87</u>	<u>63</u>	09	15	30	7	63	Guayaquil
24		1925—1962	<u>56</u>	<u>67</u>	<u>71</u>	45	22	16	25	35	<u>54</u>	<u>62</u>	<u>51</u>	24	10	28	24	15	48	Nauru
25		1938—1965	44	34	11	11	14	10	12	03	12	27	22	07	00	05	23	—	—	Osterinsel
26		1944—1965	14	13	07	17	16	11	24	<u>68</u>	<u>90</u>	<u>91</u>	<u>84</u>	58	27	11	21	—	64	$T_w$ Apia
27			44	55	<u>65</u>	<u>71</u>	<u>79</u>	<u>79</u>	58	<u>74</u>	<u>91</u>	<u>93</u>	<u>88</u>	73	69	85	86	15	55	$T_w$ Talara
28	$T_w$ Talara	1944—1965	47	31	16	27	56	<u>65</u>	37	<u>63</u>	<u>87</u>	<u>94</u>	<u>92</u>	<u>76</u>	22	27	39	2	65	Guayaquil
Harmonische			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$C_s$		

Tab. 9

Phasendifferenz  $\tau$  in Monaten und deren Fehlerbereich ( $p = 95\%$ ) für signifikante Periodenbereiche von Anomaliekohärenzen;  $T_w$  — Wassertemperatur, sonst Niederschlag

Basisstation	Zeitraum	Harm./Periode (Monate)							Mittel	Phasenbeziehung	Sekundärstation
		2/60	8/40	4/30	5/24	6/20	7/17.1				
Fanning Isl.	1903—1961	$2.6 \pm 1.6$	$2.3 \pm 1.4$	—	—	—	—	—	2.4	N	Apia
		$0.4 \pm 0.2$	$-0.4 \pm 0.1$	$-1.2 \pm 0.4$	$-1.4 \pm 0.7$	—	—	—	-0.6	P	Nauru
	$0.7 \pm 0.3$	$-0.4 \pm 0.2$	$-0.7 \pm 0.3$	$-0.2 \pm 0.1$	—	—	—	-0.2	P	Ocean Isl.	
	1935—1961	$2.3 \pm 0.5$	$1.2 \pm 0.6$	—	—	—	—	-1.1 $\pm$ 1.2	0.8	P	Canton Isl.
1900—1925	$0.9 \pm 0.8$	$0.4 \pm 0.3$	$0.4 \pm 0.4$	—	—	—	—	0.6	P	Malden Isl.	
Malden Isl.	1890—1925	—	$-1.1 \pm 0.7$	$-0.8 \pm 0.5$	—	—	—	—	-1.0	P	Nauru
		—	—	$-1.4 \pm 1.3$	—	—	—	—	(-1.4)	N	Norfolk Isl.
	1900—1925	$-0.9 \pm 0.8$	$-0.4 \pm 0.3$	$-0.4 \pm 0.4$	—	—	—	—	-0.6	P	Fanning Isl.
	—	$-4.6 \pm 4.0$	$-1.9 \pm 1.0$	$-1.4 \pm 0.8$	—	—	—	—	-2.6	P	Nauru
	—	$-1.8 \pm 1.2$	$-0.5 \pm 0.3$	$0.1 \pm 0.1$	—	—	—	—	-0.7	P	Ocean Isl.
—	$1.4 \pm 1.6$	—	—	—	—	—	—	(1.4)	N	Rarotonga	
—	$-2.9 \pm 2.8$	—	—	—	—	—	—	(-2.9)	N	Yap	
Canton Isl.	1937—1965	—	—	—	$-0.6 \pm 0.4$	$-0.1 \pm 0.1$	—	—	-0.4	P	Christmas Isl.
		$-2.3 \pm 0.5$	$-1.2 \pm 0.6$	—	—	—	—	—	-0.8	P	Fanning Isl.
	1937—1963	$8.8 \pm 3.9$	$5.7 \pm 5.9$	—	—	—	—	—	7.2	P	Manihiki
	—	$-0.9 \pm 0.9$	$(-2.1 \pm 2.4)$	—	—	—	—	—	(-0.9)	P	Nauru
	—	$-0.6 \pm 0.3$	$-1.2 \pm 0.8$	$-0.6 \pm 0.6$	—	—	—	—	-0.8	P	Ocean Isl.
—	$5.2 \pm 2.2$	$3.6 \pm 2.8$	—	—	—	—	—	4.4	P	Penrhyn Isl.	
Nauru	1890—1930	$4.3 \pm 3.0$	$2.0 \pm 0.9$	$1.5 \pm 0.7$	$1.7 \pm 1.6$	—	—	—	2.4	P	Malden Isl.
		$(1.1 \pm 1.4)$	$0.0 \pm 0.0$	$0.4 \pm 0.1$	$0.8 \pm 0.5$	—	—	—	0.4	P	Fanning Isl.
	—	$1.2 \pm 0.1$	$0.2 \pm 0.1$	$0.4 \pm 0.1$	$0.2 \pm 0.2$	$(0.0 \pm 0.0)$	—	—	0.4	P	Ocean Isl.
T <sub>w</sub> Puerto Chicama	1925—1965	$-1.1 \pm 0.7$	$1.0 \pm 0.7$	—	—	—	—	—	-0.0	P	Fanning Isl.
		$-4.6 \pm 3.4$	$(-3.8 \pm 4.7)$	—	$-1.5 \pm 1.4$	—	—	—	-3.0	P	Guayaquil
	1.7 $\pm$ 0.9	$1.0 \pm 0.5$	$0.7 \pm 0.7$	—	—	—	—	1.1	P	Nauru	
	$1.7 \pm 0.7$	$1.5 \pm 0.7$	—	—	—	—	—	1.6	P	Ocean Isl.	
	1937—1965	$0.9 \pm 0.6$	$1.9 \pm 1.7$	—	—	—	—	—	1.4	P	Canton Isl.
—	$(-3.2 \pm 3.7)$	—	$-1.2 \pm 1.1$	—	—	—	—	(-1.2)	P	Guayaquil	
—	$9.8 \pm 6.4$	—	—	—	—	—	—	(9.8)	P	Manihiki	
—	$5.6 \pm 4.5$	$(5.5 \pm 6.0)$	—	—	—	—	—	(5.6)	P	Penrhyn Isl.	
—	$5.7 \pm 3.7$	—	—	—	—	—	—	(5.7)	P	Pukapuka	

Tab. 10  
Relativer Zeitunterschied (Prozent) in Abhängigkeit  
von Periodenbereich und Phasendifferenz

Phasendifferenz (Mon.)	Periodenbereich (Mon.)				
	60	40	30	24	20
2	3	5	7	8	10
4	7	10	13	17	20
6	10	15	20	25	30
8	13	20	27	33	40
10	17	25	33	42	50

Tab. 11  
Korrelationskoeffizienten bei verschiedener Koppelung  
von R Canton Island und R Manihiki

Art der gekoppelten Werte und zeitliche Verschiebungen	n	$r_k \pm F$	3 $\sigma$ -Grenze
a) Monatsanomalien ohne zeitliche Verschiebung	286	$0.22 \pm 0.004$	0.18
b) Monatsanomalien maximal innerhalb einer systematischen Verschiebung von $\pm 12$ Monaten	277	$0.27 \pm 0.04$ bei +10 Mon.	0.18
c) Jahressummen ohne zeitliche Verschiebung	21	$0.43 \pm 0.09$	0.62
d) Jahressummen mit 8-monatiger Verschiebung. Canton I—XII, Manihiki VII—VI des Folgejahres	21	$0.66 \pm 0.11$	0.62

$F = 0.6745 \left( \sqrt{1 - r_k^2} / \sqrt{n-1} \right)$ ; Pearson-Fehler.

Tab. 12  
Phasendifferenz  $\tau$  (Mon.) der Jahresperiode mit der Basisstation R Guayaquil 1935—1965

Sekundärstation	Harmonische/Periode (Mon.)			Phasenbeziehung
	9/13.3	10/12.0	11/10.9	
Atuona	$(3.0 \pm 3.6)$	$2.8 \pm 1.8$	$2.6 \pm 2.2$	P
Eniwetok	$0.0 \pm 0.0$	$0.1 \pm 0.1$	$0.2 \pm 0.1$	N
Fanning Isl.	$1.8 \pm 1.3$	$1.7 \pm 0.8$	$1.6 \pm 0.8$	P
Nauru	$-0.9 \pm 0.9$	$-0.8 \pm 0.8$	$(-0.7 \pm 1.0)$	P
Wake	$-0.2 \pm 0.1$	$-0.1 \pm 0.05$	$-0.1 \pm 0.05$	N

Tab. 13  
Kohärenzanalyse  $T_w - R$  für Canton Island und Apia

Periode (Monate)	84	42	28	21	16.8	14	12	10.5	9.3
a) Canton Island:									
Kohärenz $K^2$	<u>0.75</u>	<u>0.71</u>	<u>0.62</u>	0.56	0.49	0.34	0.18	0.13	0.12
Phasendifferenz $\tau$ (Mon.)	—	-0.3	-0.3	-0.3	0	0.1	-0.2	-0.7	-0.5
b) Apia:									
Kohärenz $K^2$	0.01	0.03	0.16	0.27	0.24	<u>0.78</u>	<u>0.89</u>	<u>0.82</u>	0.34
Phasendifferenz $\tau$ (Mon.)	—	-2.9	-3.5	-2.8	-0.3	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6

Tab. 14

Trend in Niederschlagsreihen (Jahresgang eliminiert)  
für verschiedene Zeiträume

Station	Zeitraum			
	1890—1925	1937—65	1925—65	1900—65
Aitutaki	—	1.3	—	—
Alofi	—	1.8	1.7	—
Apia	1.7	2.5	2.2	2.1
Atuona	—	8.2	—	—
Canton Isl.	—	6.8	—	—
Casa Grande	—	0.9	—	—
Christmas Island	—	8.2	7.6	—
Eniwetok Atoll	—	2.1	—	—
Fanning Isl.	7.4	7.8	7.2	7.8
Juan Fernandez	3.2	4.1	—	—
Funafuti	—	5.0	—	—
Guam	—	1.5	—	—
Guayaquil	—	2.3	3.2	—
Koror	—	0.5	—	—
Malden Island	6.1	—	—	—
Manihiki	—	2.4	—	—
Nauru	5.5	6.7	5.8	5.6
Norfolk Island	3.5	1.0	1.0	1.7
Ocean Island	6.2	8.8	7.0	7.0
Osterinsel	—	2.8	—	—
Papeete	—	1.3	1.2	2.2
Penrhyn Island	—	7.1	—	—
Pukapuka	—	1.6	—	—
Rabaul	—	1.4	1.8	—
Rarotonga	2.6	1.0	1.4	1.8
Suva/Fiji	3.2	1.0	1.1	1.5
Taiohae	—	4.8	—	—
Truk	—	1.2	—	—
Tulagi	5.8	—	—	—
Port Vila	2.1	4.2	3.6	3.1
Wake Island	—	3.3	—	—
Yap Island	1.3	—	—	—

Erläuterung: Unter Trend verstehen wir die relative Varianz (%), die der Spektrumschätzwert  $S(0)$  zum gesamten Spektrum beiträgt. Das in Gleichung [9] dargestellte Glättungsverfahren bedingt, daß die 0. und 1. Harmonische einen Beitrag liefern. Die 0. Harmonische gibt den linearen Trend wieder, die 1. Harmonische eine Sinusschwingung mit der Frequenz 1 (bezogen auf den gesamten analysierten Zeitraum). Ein Zufallsspektrum würde einen Wert von 1.7 ergeben.

Tab. 15  
Mittlere Monatssummen der Niederschlagshöhe (mm) verschiedener Stationen im Bereich des tropischen Pazifiks und deren Extremwerte (s. Erläuterungen S. A 27)

Station	Zeitraum	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr	n	abs. monatl.	
																Max.	Min.
Aitutaki	1932—1963	191	238	214	151	159	74	83	62	90	115	179	250	1807 <sup>1)</sup>	380	789	5 <sup>2)</sup>
Alofi	1925—1963	267	275	340	175	120	88	119	97	89	146	174	185	2075	468	963	4
	1937—1963	251	269	339	194	104	105	119	89	101	143	175	188	2077	324	963	4
Apia	1890—1965	423	373	350	237	172	132	94	100	136	193	262	368	2842	909	1513	2
	1937—1965	374	356	341	208	188	144	113	115	142	229	258	368	2836	345	1513	2
Atuona	1937—1965	84	100	115	99	91	186	116	94	96	69	55	77	1182	319	582	1
Canton Isl.	1937—1965	70	50	57	84	92	60	65	63	35	34	43	72	725	320	558	0
Casa Grande	1937—1963	2	4	3	2	0	0	0	0	0	1	1	1	15	243	22	0
Christmas Isl.	1925—1965	124	146	198	172	124	108	70	30	27	27	65	112	1201	327	575	0
	1937—1965	108	104	175	173	99	92	76	27	29	27	63	95	1066	238	575	0
Eniwetok Atoll	1941—1965	26	39	43	49	120	96	179	178	186	265	161	80	1422	237	623	1
Fanning Isl.	1903—1961	206	222	231	318	309	270	186	110	73	79	82	162	2248	677	1346	0
	1937—1961	166	199	206	312	310	286	164	111	77	76	98	138	2144	300	670	1
Juan Fernandez	1902—1950	21	32	43	88	154	164	167	114	77	55	39	27	981	535	404	0
Funafuti	1932—1965	424	399	344	251	215	250	261	274	243	288	292	410	3652	401	1293	41
	1937—1965	426	407	355	261	227	252	284	291	239	296	305	423	3765	347	1293	41
Guam	1910—1965	136	74	73	72	129	149	325	375	381	329	199	136	2377	492	778	3
	1937—1965	244	71	60	124	158	158	258	340	392	318	198	160	2480	170	636	5
Guayaquil	1937—1965	191	257	262	187	55	11	4	0	0	1	1	27	998	347	595	0
Koror	1937—1965	266	231	203	217	360	320	391	380	334	295	305	316	3618	186	884	16
Malden Isl.	1890—1925	85	47	115	115	111	51	49	39	20	23	18	20	692	380	654	0
Manihiki	1938—1963	308	230	181	141	148	144	153	156	181	235	230	268	2375	306	899	17
Manokwari	1914—1950	322	236	341	289	175	166	116	144	130	134	170	242	2466	344	1640	0
Midway Isl.	1917—1950	124	89	82	81	57	62	87	115	115	89	83	101	1085	393	578	1
Nauru	1892—1962	272	241	201	164	123	131	159	161	128	122	159	246	2108	711	861	0
	1937—1962	273	232	212	202	154	145	155	147	114	115	166	225	2140	259	656	0
Norfolk Isl.	1900—1965	82	86	102	131	147	136	147	134	91	99	65	87	1308	683	473	3
	1937—1965	91	84	124	154	142	143	140	158	79	105	70	89	1379	260	473	8
Ocean Isl.	1904—1963	291	209	182	140	113	113	139	104	92	93	134	199	1809	622	679	0
	1937—1963	232	180	166	148	122	128	115	93	74	91	126	177	1652	228	535	0
Osterinsel	1938—1965	93	86	94	109	124	107	95	78	68	76	91	96	1117	329	385	0
Papeete/Tahiti	1900—1963	329	279	179	140	122	72	66	57	73	101	168	299	1886	590	1365	0
	1937—1963	374	250	150	119	133	65	67	51	91	80	181	257	1819	316	1365	0
Penrhyn Isl.	1938—1963	197	169	196	152	128	146	168	146	109	154	167	158	1889	293	659	4
Port Vila	1905—1965	269	252	309	235	147	122	98	90	104	105	156	186	2071	696	779	3
	1937—1965	281	237	337	231	157	135	111	99	107	99	163	196	2153	338	708	5
Pukapuka	1932—1963	346	316	240	177	189	168	166	158	168	240	276	352	2796	374	668	16
	1937—1963	358	296	249	164	193	172	157	156	173	230	254	325	2726	318	656	16
Rabaul	1912—1965	309	246	254	236	135	102	122	116	94	128	181	247	2171	510	949	3
	1937—1965	235	227	248	205	137	123	102	122	99	130	185	239	2053	234	808	3
Rarotonga	1900—1963	255	233	284	174	143	103	108	118	104	132	151	224	2028	766	973	4
	1937—1963	253	222	266	162	151	97	92	116	99	133	150	204	1944	322	909	4
Suva/Fiji	1900—1965	308	313	388	346	263	174	147	202	205	206	260	312	3122	777	1154	3
	1937—1965	314	315	373	385	232	178	145	163	213	172	256	294	3039	345	1154	12
Taiohae	1940—1963	71	87	122	112	84	155	134	121	84	50	53	52	1124	275	488	0
Truk	1935—1965	214	156	194	294	371	288	386	317	339	325	304	362	3550	229	886	24 <sup>2)</sup>
Tulagi	1898—1941	381	406	380	264	207	176	199	194	200	233	261	258	3157	511	1530	5
Wake Isl.	1937—1965	26	30	53	54	49	58	119	205	133	157	76	46	1006	225	496	2
Yap	1900—1940	175	154	134	141	251	259	422	413	351	319	262	242	3122	482	1162	5

<sup>1)</sup> Jahressummen und Monatsmittel sind mit mehreren Dezimalstellen gerechnet worden. Abweichungen der Jahressumme von hier gegebenen Monatsmitteln sind durch Abrundung zu erklären.

<sup>2)</sup> Extremwerte beziehen sich nur auf den Zeitraum 1937—1965.

Tab. 16

Autokorrelationskoeffizienten von Monatsanomalien des Niederschlags (R) und der Wassertemperatur (T<sub>w</sub>) mit Zeitschritten von 1-30 Monaten (in 0,01) (s. Erläuterungen S. A. 27)

Station	Zeitraum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	N <sub>1</sub>	N <sub>20</sub>		
Zufallszahlen																																			
R	Malden Isl.	04	01	00	07	03	04	-00	-04	08	09	08	05	-01	-10	-01	-10	-08	-01	-03	-02	-02	-03	-03	-04	-02	-01	-03	01	-01	02	359	330		
R	Apia	28	20	18	11	10	03	20	10	14	04	03	-01	-08	-07	-04	-04	-05	-02	-04	-04	-07	-08	-05	08	01	15	03	04	06	05	360	308		
R	J. Fernandez	71	63	51	42	30	18	09	03	00	-06	-06	-10	-04	-05	-04	-07	-02	04	-03	-04	-01	04	-00	-02	-05	02	-04	-06	-08	244	196			
R	Nauru	22	18	16	01	05	05	04	07	01	-02	01	09	09	-02	02	02	06	02	02	-10	-10	-17	-10	-04	-00	04	-05	-04	01	227	168			
R	Norfolk Isl.	53	54	41	32	30	30	21	20	07	05	04	04	-09	-11	-15	-15	-15	-15	-14	-20	-14	-16	-09	-16	-16	-12	-10	-12	-07	-13	307	233		
R	Ocean Isl.	1891-1925	25	05	08	09	06	04	08	06	02	10	06	00	01	12	07	-05	02	11	02	-08	-04	01	00	07	01	-04	02	05	-05	400	356		
R	Rarotonga	1900-25	58	47	36	36	35	29	26	20	20	15	11	04	-00	-05	-12	-19	-16	-12	-11	-21	-16	-17	-18	-23	-22	-16	-14	-10	-15	-17	262	233	
R	Suva Fiji	1890-1925	05	08	01	09	-05	06	02	07	05	08	-01	-02	-05	02	07	09	07	02	-05	-14	09	03	06	-08	18	-04	00	-13	-07	-08	311	282	
R	Port Vila	1898-1925	30	31	37	22	18	20	14	07	11	01	02	-03	03	02	-00	03	-02	07	02	-00	08	03	01	-05	02	01	01	-12	-08	-06	405	357	
R	Yap	1905-25	14	-05	-09	-02	12	01	05	07	08	04	09	00	00	-01	00	07	-01	-03	-10	07	19	07	-08	-13	-04	-04	02	-03	-14	-08	331	303	
R	Yap	1900-25	18	03	02	06	10	04	-11	-17	-06	03	-01	-10	-13	01	08	06	-01	-05	-04	08	06	-11	-08	-07	00	07	-00	-05	-04	06	298	262	
R	Canton Isl.	1937-65	56	52	38	24	23	09	12	10	13	12	14	12	19	14	02	00	-04	-08	-09	-10	-06	-02	-10	-14	-11	-12	-06	-10	-11	-08	317	270	
R	Aitutaki	1937-65	06	-03	-01	-05	-03	15	01	-04	-00	05	04	-10	03	02	-05	-06	04	03	06	07	-08	07	-07	00	-06	00	-06	-14	02	-08	319	290	
R	Alofi	1937-63	07	-05	00	00	04	05	-02	03	08	-03	-04	-13	-02	08	02	-04	09	06	-04	02	01	07	08	07	04	05	01	01	-01	-01	323	294	
R	Apia	1937-65	13	16	07	-00	10	-01	-03	02	00	06	00	-02	-01	03	09	08	00	-03	03	03	02	-09	-05	06	-06	-02	-09	-08	-00	341	312		
R	Atuona	1937-65	32	20	18	16	18	10	22	13	15	10	03	08	05	12	13	17	11	12	06	14	07	13	10	14	19	14	10	06	13	312	261		
R	Fanning Isl.	1937-61	50	45	35	32	29	22	20	16	16	18	14	10	19	10	09	-02	00	-04	-05	-04	-11	-08	-18	-18	-19	-20	-15	-13	-13	299	270		
R	Funafuti	1937-65	32	28	21	13	09	06	-03	-02	-02	-04	-01	-11	-02	-02	03	05	17	15	12	17	18	15	17	00	12	-02	-01	04	07	-08	346	317	
R	Guayaquil	1937-65	38	15	03	-04	-01	00	01	-01	-04	04	03	-06	-03	-04	-00	02	-00	-01	00	-02	00	03	01	-01	03	01	00	00	345	317			
R	Manihiki	1938-63	20	06	12	13	07	01	-01	11	04	00	00	-01	-07	-05	-02	02	04	-01	-02	-08	-04	07	06	09	07	-03	-01	-08	-07	-09	303	273	
R	Nauru	1937-62	59	56	47	42	34	27	27	25	16	10	06	-01	-04	-07	-08	-08	-12	12	-12	-14	-15	-18	-22	-20	-21	-26	-24	-22	-25	255	198		
R	Norfolk Isl.	1937-65	00	05	-03	04	11	00	-01	07	-01	-12	-08	10	-01	-06	-08	03	06	02	-11	-06	05	-08	02	-13	02	10	-05	07	02	-09	238	180	
R	Ocean Isl.	1937-63	66	58	53	43	40	32	36	40	33	34	27	15	10	03	-07	-10	-10	-08	-13	-18	-25	-29	-35	-41	-34	-35	-36	-32	-31	224	144		
R	Osterinsel	1938-65	12	08	-05	18	-03	02	-08	05	01	18	08	-01	-01	09	01	-11	-04	03	09	06	01	-01	07	04	04	02	03	01	08	04	326	285	
R	Papeete/Tahiti	1937-63	-11	00	-04	01	-00	03	04	01	01	-03	09	-10	06	-02	02	02	-02	01	-06	17	02	-00	-04	08	09	-06	02	-05	-04	-09	315	286	
R	Penrhyn Isl.	1938-63	37	34	25	22	21	14	20	12	16	20	12	26	16	06	06	01	-02	10	-02	-10	-02	-08	-14	-18	-10	-06	01	01	-07	-16	-20	287	252
R	Pukapuka	1937-63	05	10	07	10	06	06	06	-05	-02	-07	12	-08	-04	-05	-12	-08	-05	-02	-02	02	11	01	-01	-04	08	-03	06	-05	-09	-06	313	284	
R	Rarotonga	1937-63	04	-10	03	07	01	-02	-03	-07	06	-01	-00	-01	04	03	-13	-10	07	-00	01	-03	-02	05	04	-08	03	06	00	03	-03	03	320	291	
R	Suva/Fiji	1937-65	03	07	-01	10	01	-02	00	-02	-07	01	-06	02	-07	00	06	-01	04	02	-03	-03	-01	-06	-02	02	03	-04	-00	00	01	-01	342	314	
R	Taiobae	1940-63	31	25	14	18	10	09	02	03	03	05	-00	-00	10	06	04	-05	05	14	07	01	01	08	11	03	07	-07	04	-01	03	273	233		
R	Port Vila	1937-65	09	14	18	08	07	06	09	10	06	08	04	03	-02	12	08	09	05	04	07	04	01	-02	03	-10	-10	-02	-04	00	-01	335	298		
Zufallszahlen																																			
R	Apia	1900-65	-06	-02	02	02	08	-02	-06	00	02	04	07	-09	02	-04	02	-04	-06	-04	-04	01	-05	-03	-09	06	02	-00	-08	00	-02	599	570		
R	Papeete/Tahiti	1900-63	12	18	08	03	06	01	-02	01	00	06	02	00	-05	-02	01	00	01	-03	-02	01	-01	-05	-05	01	03	-04	-03	00	-04	785	756		
R	Rarotonga	1900-63	-07	14	-05	07	-03	03	06	04	05	01	05	-01	01	06	-02	01	-02	02	-03	13	02	04	-08	04	01	-01	02	-01	00	-07	598	516	
R	Suva/Fiji	1900-65	06	04	03	08	-02	-05	05	-04	-04	03	00	00	-04	02	-05	-04	-00	08	01	-06	02	05	06	-06	09	01	00	-07	-04	-02	764	735	
R	Norfolk Isl.	1900-65	05	-01	00	09	07	-01	01	06	01	02	-03	05	01	-01	-01	06	-01	-06	-05	02	04	-04	-06	08	02	01	02	-05	05	-00	773	734	
R	Fanning Isl.	1903-61	59	49	38	30	24	17	14	11	12	06	06	03	10	09	07	-02	01	02	-02	02	01	05	-03	02	00	02	01	-04	-06	-05	07	659	582
R	Nauru	1900-62	54	49	38	27	27	24	19	15	04	03	01	-01	-03	07	-09	-09	-08	-08	-12	-12	-11	-09	-13	-10	-08	-10	-10	-06	-13	623	527		
R	Ocean Isl.	1904-63	60	47	38	33	30	26	24	21	21	20	13	08	04	-01	-08	-11	-09	-06	-07	-14	-14	-13	-17	-20	-19	-15	-14	-09	-15	618	538		
T <sub>w</sub>	P. Chicom	1925-65	78	62	54	46	40	34	32	29	27	27	21	19	17	16	15	15	16	17	17	20	20	17	15	13	10	17	06	04	03	491	462		
T <sub>w</sub>	Canton Isl.	1950-65	94	88	80	71	61	50	40	30	21	13	06	-00	-05	-08	-12	-14	-17	-19	-20	-22	-24	-26	-30	-35	-39	-41	-43	-44	-46	181	152		
T <sub>w</sub>	Apia	1944-65	79	65	58	52	53	51	48	44	35	30	26	27	24	25	23	23	23	22	20	16	10	14	09	11	07	04	10	08	02	00	04	234	200
T <sub>w</sub>	Talara	1944-65	53	40	34	26	14	18	11	10	08	04	-01	-08	-02	-06	-12	-10	-04	-04	08	07	08	08	19	07	04	10	08	02	05	04	237	210	
T <sub>w</sub>	La Libertad	1928-55	58	41	32	20	15	15	14	12	06	06	04	-02	00	-04	02	06	04	04	04	07	13	10	12	08	08	13	15	11	07	02	335	306	



Tab. 17  
Korrelationskoeffizienten von Monatsanomalien des Niederschlags mit Zeitschritten von -15 bis +15 Monaten (in 0,01)

Basistation (Zeitraum)	Sekundärstation vorlaufend															Basistation vorlaufend															N <sub>15</sub>	N <sub>0</sub>	N <sub>15</sub>	Sekundär- station			
	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	+11	+12	+13	+14					+15		
Malden Isl. (1890—1925)	-01	04	-02	04	-01	04	-06	-09	-08	-04	-15	-07	-11	-10	-12	-17	-12	-06	-11	-06	-08	-10	-05	-03	01	01	02	04	16	13	377	362	Apia				
	-07	01	04	05	14	22	28	32	37	40	38	44	44	46	43	36	32	31	30	25	17	14	05	01	-03	01	-01	-12	-17	-10	-12	218	197	Fanning Isl.			
	-04	-02	-03	01	10	07	08	10	08	06	05	10	01	06	08	13	06	16	01	06	04	04	04	03	07	06	01	-07	-08	-15	-18	204	186	J. Fernandez			
	-01	-10	-03	-05	05	11	17	21	32	29	33	27	24	30	25	38	25	22	10	11	09	01	-03	07	07	-02	-12	-15	-18	254	264	Nauru					
	02	05	04	-06	-04	-08	-12	-07	-10	-12	-14	-12	-13	-16	-20	-18	-19	-12	-13	-10	-10	-08	-06	-09	-07	-03	06	00	01	06	357	339	Norfolk Isl.				
	04	-01	04	05	13	23	29	35	37	42	42	36	36	30	34	40	40	42	36	28	26	23	10	00	03	04	-05	-07	-02	-15	219	207	Ocean Isl.				
	11	03	-01	04	00	04	05	06	06	03	-08	-07	-08	-09	-14	-19	-20	-24	-22	-16	-14	-16	-14	-12	-12	-03	00	11	04	01	265	250	Rarotonga				
	11	03	-01	03	00	01	06	04	09	02	08	07	08	08	08	04	-06	-05	-01	05	-04	-04	-04	-04	-01	00	02	12	03	10	11	358	343	Suva/Fiji			
	-07	-00	-03	-00	-02	00	03	04	08	04	-12	-12	-15	-25	-30	-22	-25	-19	-18	-18	-21	-22	-21	-18	-16	-18	-08	-14	-03	10	11	292	277	Tulagi			
	-01	02	02	03	10	-02	05	04	10	-12	-09	-05	-02	-14	-09	-09	-12	11	02	02	-08	-15	-10	-01	-10	-11	-10	-09	-11	-12	193	184	Port Vila				
	02	-05	-01	02	-02	-05	-01	-09	-01	-01	-09	-22	-18	-24	-19	-19	-11	-13	-07	-11	-10	-10	-18	-12	02	03	00	04	03	06	262	246	Yap				
	Zufallszahlen	-07	03	-09	-07	02	03	02	04	-06	02	07	04	02	-08	03	10	06	01	07	11	05	-05	09	02	12	12	-04	-02	07	10	-09	360	345	Zufallszahlen		
		-05	03	10	03	00	-03	-02	-07	-08	-07	-08	-07	-12	-14	-16	-12	-15	-12	-10	-06	-07	-15	-11	-09	-12	-02	-05	-06	-01	01	292	277	Altutaki			
		-03	-03	02	-11	-08	04	01	-06	-08	-10	-12	-02	-04	-00	-07	-03	-08	-06	-10	-00	-10	-11	-11	-03	-00	-10	-05	-07	-00	-03	-01	296	281	Alofi		
		06	06	10	10	08	-01	04	02	-04	06	03	08	14	17	33	24	34	24	12	15	10	11	10	-06	-10	-11	-06	-06	-04	-03	317	302	Apia			
-02		06	10	10	08	01	04	02	-04	06	03	08	14	17	33	24	34	24	12	15	10	11	10	-06	-10	-11	-06	-06	-04	-03	14	17	14	291	276	Atuona	
26		24	28	26	24	24	24	24	24	24	25	24	35	32	45	46	49	54	45	42	30	21	30	17	19	12	10	12	02	06	02	03	272	257	Fanning Isl.		
03		02	15	13	13	10	19	14	14	20	21	16	19	11	04	04	-06	04	-01	09	13	07	04	04	03	01	00	01	-02	-04	-02	319	304	Funafuti			
-11		-14	-08	-07	-01	-01	-01	-02	-07	-06	-00	-03	07	07	13	22	14	15	17	13	10	03	01	-07	-04	-07	-05	-03	-11	-04	-01	319	304	Guayaquil			
05		02	10	09	14	21	21	24	22	25	25	32	35	37	46	43	41	36	30	31	25	22	20	12	15	06	08	09	02	-02	02	240	225	Nauru			
-07		-04	-02	-08	-04	-15	-24	-19	-21	-13	-09	-14	-09	-04	-11	-07	04	-07	-03	-08	-03	-06	01	-02	07	17	12	14	10	16	11	233	219	Norfolk Isl.			
08		09	15	21	20	27	29	26	28	26	30	34	38	45	51	44	48	44	35	39	31	27	22	23	16	16	17	12	04	00	230	194	Ocean Isl.				
-04		-04	-00	-02	-04	-00	-02	04	-00	-02	04	-00	12	12	09	07	10	04	-02	08	03	08	14	12	13	04	09	04	09	04	16	11	18	09	369	297	Osterinsel
-03		-03	01	05	02	-11	-12	-07	-09	00	-05	-03	-02	-06	-06	-04	-15	-06	-12	-08	-08	-03	-02	-04	-05	-03	-06	-07	-10	00	-08	01	-03	288	273	Papeete/Tahiti	
-05		-04	-01	02	-02	01	03	04	04	00	06	20	26	28	35	41	37	29	30	25	24	26	32	35	32	34	35	35	19	20	273	262	Penrhyn Isl.				
-04		-03	13	04	00	08	09	03	01	05	-03	01	-11	-10	-17	-09	-08	-06	-05	-02	02	-06	-10	-08	-16	-09	-08	-11	-07	07	00	294	279	Rarotonga			
00	-04	-04	-05	-08	-02	02	01	-05	-06	01	-05	-07	-08	03	-07	-03	08	-00	07	00	00	-02	01	-11	-05	02	05	03	-04	317	302	Suva/Fiji					
00	10	08	08	05	01	-02	-06	-11	-08	-02	04	06	09	23	18	15	10	02	11	11	21	19	14	20	09	13	11	14	11	255	241	Taiohae					
02	-09	02	03	03	03	08	-07	05	-10	-10	-04	-11	-10	-14	-12	-17	-11	-05	-10	-04	-14	-12	-09	-08	-11	-11	-07	-06	-07	310	302	Port Vila					
Zufallszahlen	-04	-04	04	00	-02	-07	06	-00	-02	-10	-04	05	06	-03	05	-00	-00	05	-07	06	-01	05	-05	-01	-03	-04	02	05	-00	01	03	690	585	Zufallszahlen			
	-13	-11	-07	04	08	10	12	16	21	29	33	39	37	36	39	36	33	27	21	12	11	08	09	06	08	00	-02	-02	-06	-06	567	566	Nauru				
	-03	08	06	06	10	24	24	23	18	10	11	10	12	05	06	04	10	12	10	06	06	02	03	02	-04	-01	01	00	-03	-02	06	324	309	Guayaquil			
Zufallszahlen	03	07	12	10	13	16	27	26	22	22	21	22	27	41	41	36	28	16	09	08	06	04	03	04	02	-03	00	03	-01	01	407	392	Guayaquil				
	14	14	17	14	13	16	13	11	10	13	16	19	29	36	41	44	44	38	34	29	24	23	25	24	20	22	15	06	03	-01	04	438	424	Fanning Isl.			
	-03	-03	-01	01	05	10	09	12	16	19	26	34	44	41	43	44	40	37	36	34	31	28	27	21	20	17	13	13	14	13	11	403	388	Nauru			

T<sub>w</sub> = Wassertemperatur, sonst Niederschlag.

Erläuterungen zu den Tabellen 15 bis 17

Tab. 15:

Das Fehlen neuerer Zusammenstellungen von Niederschlagsdaten aus dem Bereich des tropischen Pazifiks ließ es angeraten erscheinen, das hier gesammelte und verarbeitete Zahlenmaterial wenigstens in der Form vieljähriger Monatsmittel und der mittleren Jahressummen zu ver-

öffentlichen. In Tab. 3 der Originalarbeit sind die Quellen angegeben.

Die Stationen wurden alphabetisch geordnet. Zunächst werden für den längsten vorliegenden Zeitraum die Mittelwerte genannt. Viele Stationen weisen nur im Abschnitt von etwa 1937-66 gleichzeitige Beobachtungen auf. Zwecks besserer Vergleichbarkeit wird deshalb bei den längeren Reihen dieser Zeitabschnitt zusätzlich erwähnt. Die Beobachtungen sind nur in wenigen Fällen lückenlos, weshalb neben dem Zeitraum die Anzahl der vorliegenden Monatssummen (n) genannt wird.

Tab. 16 und 17:

Die wiedergegebenen Werte stellen lineare Korrelationskoeffizienten (Kkf.) mit Zeitschritten dar ( $\Delta t = 1$  Monat). Sie wurden aufgrund von Anomalien ( $\Delta R$ , bzw.  $\Delta T_w$ ) errechnet. Bei den Autokkf. wurde der Zeitschritt 0 Monate ( $t = 1$ ) weggelassen.

Die Kreuzkff. lassen zeitliche Verschiebungen durch Maxima und Minima der Kkf.-Funktion erkennen, die vom Zeitschritt 0 verschoben sind. Die Richtung der zeitlichen Verschiebung läßt sich durch Pfeile andeuten, deren Ursprung in den Nullwert und deren Spitze in das Extremum

gelegt werden müßten. Oft treten sekundäre Maxima und Minima auf. Aus diesen und anderen Gründen (s. Abschn. 6.5.2.) wurde auf eine derartige Kennzeichnung verzichtet.

Unter N<sub>15</sub> wird immer der Kollektivumfang angegeben, von N<sub>0</sub> und N<sub>-15</sub> der Kleinere ist, so daß im Falle der Berechnung von Signifikanzgrenzen der ungünstigste Fall geprüft werden würde.

In beiden Tabellen werden mit vergleichbaren Kollektivumfängen Kkf. von Zufallsreihen angeführt, die mit dem Standardprogramm „RDM“ des „Rheinisch-Westfälischen Instituts für Instrumentelle Mathematik“ erzeugt wurden.

