

## TAGESPERIODISCHE ZIRKULATION UND NIEDERSCHLAGSVERTEILUNG AM VICTORIA-SEE (OSTAFRIKA)

HERMANN FLOHN und KLAUS FRAEDRICH

*Summary:* On the base of a descriptive investigation on the diurnal variation and the horizontal distribution of wind and rainfall at Lake Victoria, it is demonstrated that the marked rainfall maximum near the centre of the Lake — 230 cm per year instead of 100—150 cm along the coast-lines — is correlated with the convergence of the regular nocturnal land-breezes above the lake. With the easterly component of the large-scale wind-system, the area of maximum convergence is shifted towards the western part of the lake, thus including the coastal area of Bukoba. A similar pattern is also shown on a picture from the Nimbus I-Satellite. As an effect of the diverging sea-breezes the lake area is clear or cloudless during day-time. The diurnal variation of rainfall and especially of the frequent thunderstorms — with frequency peaks during night and early morning at the lake, during afternoon and evening at land — confirms the effect of diurnal winds. The rainfall distributions depend also on varying synoptic processes and on the seasonal variation of the three-dimensional patterns of wind, temperature and moisture.

### I. Problemstellung

Der rund 68500 km<sup>2</sup> (≈ Bayern) große Victoria-See in Ostafrika — mit seinem Kerngebiet in 0 bis 2,5° S-Breite und 32 bis 34° Ostlänge gelegen, mit seinen Ingressionsbuchten und Inseln aber allseitig weit über die genannten Linien hinausreichend — bietet wegen seiner äquatorialen Lage und seiner flachhügeligen Umgebung ein besonders dankbares Objekt für Studien zur Gelände- oder Topoklimatologie [1—3], allerdings in einem Maßstab, der (jedenfalls nach europäischen Begriffen) als großräumig bezeichnet werden muß. Seine Ausdehnung in nordsüdlicher oder ostwestlicher Richtung beträgt jeweils etwa 250 km, ohne die tief eingreifenden Buchten, von denen etwa der Kavirondo-Golf bei Kisumu oder der Speke-Golf im Südosten die Maße des Bodensees weit überschreiten.

Seine Rolle in der Geschichte der Aerologie sollte nicht vergessen werden: hier haben BERSON u. ELIAS [4] bereits 1908 von Schirati aus die ersten aerologischen Aufstiege in der Äquatorzone durchgeführt, mittels Drachen, Fesselballon und Registrierballon; hier wurde die äquatoriale Tropopause in 16—17 km Höhe gefunden und das Land-Seewind-System

Die Existenz regelmäßiger tagesperiodischer Vorgänge von großräumig-synoptischem Ausmaß an diesem See wurde auf dem Munital-Symposium über tropische Meteorologie Afrikas in Nairobi 1959 [9] von verschiedenen Autoren betont. Untersuchungen über die tägliche Variation des Niederschlages [10] und Statistiken über die Windverteilung an ostafrikanischen Stationen [11] regten eine nähere Untersuchung der klimatischen Bedeutung der tagesperiodischen Phänomene an, die bei zwei kurzen Aufenthalten an der Nordküste (Jinja-Entebbe) im November/Dezember 1959 meteorologisch außerordentlich eindrucksvoll erschienen. Auf die große Bedeutung der tagesperiodischen Zirkulationen für Wetter und Klima in den Tropen haben Geographen wie TROLL [12] und Meteorologen wie BRAAK [13] in vielen Veröffentlichungen hingewiesen. In der Region Rotes Meer—Somalihalbinsel [14], wo der Unterschied Land—Meer im Wärmehaushalt in der ariden Zone besonders groß ist, zeigte sich dieser Effekt besonders eindrucksvoll; die Reichweite tagesperiodischer Zirkulationen beiderseits der Küste kann auf 150, ja 200 km ansteigen.

Hier soll gezeigt werden, wie sich diese regelmäßigen tagesperiodischen Zirkulationen selbst in der mittleren jährlichen Verteilung der Niederschläge — mit einem Maximum mitten auf dem See — auswirken. Diese Konvergenzen der Windsysteme können heute von meteorologischen Satelliten aus in einer einzigen Fernsehaufnahme überschaut werden.

### II. Beobachtungsmaterial

Die meteorologischen Beobachtungsdaten am Victoria-See sind in dem unter einheitlicher Leitung stehenden East African Meteorological Department (Nairobi) bis in die neueste Zeit hinein für die Tropen bemerkenswert reichhaltig. So liegen dem Gebietsmittel der Niederschläge für den Victoria-See

Tabelle 1. Stationsverzeichnis

Name und Lage der Station	Breite	Länge (E)	Höhe (m)	Zeitperiode (Wind)	Quelle
Bujumbara, Tanganyika-See (früher Usumbura)	3°21' S	29°32'	800	1904—1910, 1912	f
Bukoba	1°20' S	31°49'	1144	1954—1958	a, b, f
Butiaba (Albert-See)	1°50' N	33°20'	621	1947—1951	a, b
Entebbe	0°04' N	32°29'	1182	1954—1958	a, b, c
Jinja	0°26' N	33°12'	1182	1954—1958	a, b
Kampala (Kololo Hill)	0°20' N	32°36'	1312	1950—1954	a, b, c
Kigoma (Tanganyika-See)	4°53' S	29°38'	855	1954—1958	a, b
Kisumu	0°06' S	34°45'	1149	1954—1958	a, b, c
Musoma	1°30' S	33°48'	1148	1954—1958	a, b, f
Mwanza (früher Muansa)	2°31' S	32°54'	1131	VII 1956—VI 1959	a, b
Neuwied-Marienhof (Ukerewe)	2°01' S	33°02'	1200	V 1904—XII 1913	e, f
Rubja-Ihangiro	1°47' S	31°37'	1420	(1908—1910, 1912)	f
Shirati	1°08' S	33°59'	1158	—	f, g

eines tropischen Sees erforscht. Vor allem entdeckten die Autoren erstmals die heute so oft diskutierten stratosphärischen Westwinde, die PALMER [5] 46 Jahre später — noch in Unkenntnis der (erst 1959 aufgefundenen) 26monatigen „Oscillation“, in Wirklichkeit ein System langsam abwärts wandernder äquatorialer Ringe mit West- bzw. Ostwinden — zu Ehren ihres Entdeckers als „Berson-Westerlies“ bezeichnet hat. Die Seespiegelschwankungen des Victoria-Sees erregten u. a. das Interesse von BROOKS [6], wenn auch heute das Fehlen klarer Beziehungen zur Sonnenaktivität (vgl. [7] und die in [8] gegebene Kurve) gesichert erscheint; der phänomenale Anstieg seit November 1961 [8] — parallel zu entsprechenden Vorgängen in weiten Gebieten Zentralafrikas — verdient ebenfalls allgemeines Interesse.

292 Regenstationen zugrunde; 5 synoptische Stationen beobachten zu täglich 2, 5 oder 8 Terminen. Die Pilotballonbeobachtungen dieser Stationen konnten allerdings zu dieser Vorstudie noch nicht herangezogen werden, ebenso die Radiosonden- und Entebbe; hierüber soll zu einem späteren Zeitpunkt berichtet werden.

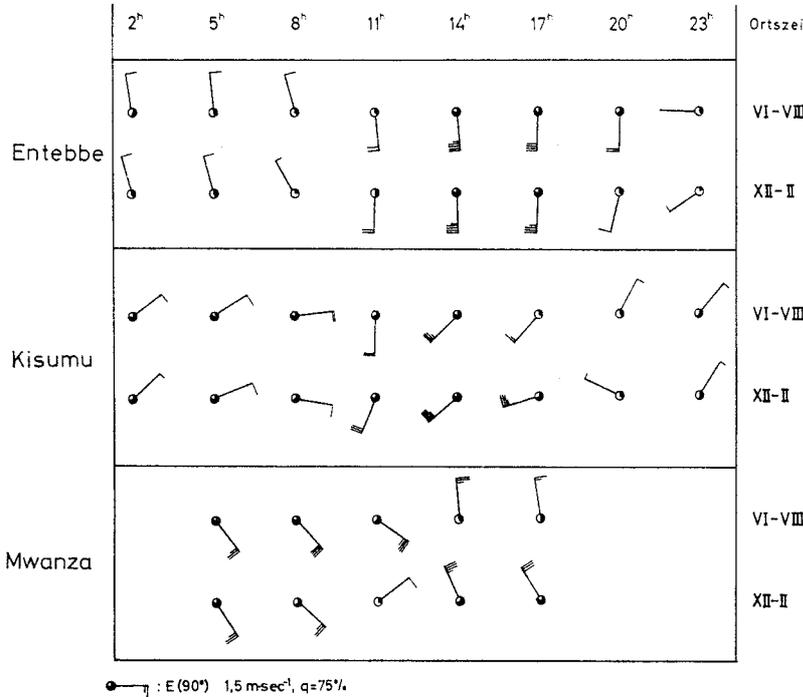
Folgende Quellen aus neuerer Zeit wurden herangezogen:

- a) East African Meteorological Department: Frequencies of Surface Wind Speeds and Directions (1961)  
 Part I (Kenya): Kisumu.  
 Part II (Uganda): Butiaba, Entebbe, Jinja, Kampala,  
 Part III (Tanganyika): Bukoba, Kigoma, Musoma, Mwanza.

- b) East African Meteorological Department: Summary of Rainfall in Kenya (in Uganda, in Tanganyika und Zanzibar) for the years 1961, 1962, 1963, 1964.
- c) THOMPSON: The Diurnal Variation of Precipitation in British East Africa. Mem. East African Meteor. Department 8 (1957).
- d) MÖRTH: Report on Investigations into the Meteorological Aspects of the Variations in the Level of Lake Victoria (July 1965, unpublished).

Marienhof auf der flachhügeligen Insel Ukerewe (beide Stationen in ca. 5 km Entfernung, daher hier zusammengefaßt).

- f) Meteorologische Beobachtungen aus Deutsch-Ostafrika, in: Mitteilungen aus den Deutschen Schutzgebieten Band 21—27 (1908—1914), enthält Monats- und Jahresmittel der Klimabeobachtungen der Stationen II. und III. Ordnung. In früheren Bänden befinden sich nützliche Stationsbeschreibungen und Schilderungen des Witterungsablaufes.



● : E (90°) 1,5 msec<sup>1</sup>, q=75%

Abb. 1. Lokalwinde an acht Terminen für Entebbe, Kisumu und Mwanza

Tabelle 2. Mittlere Ortszeit des Umschlages zwischen nächtlichem Landwind und Tages-Seewind

		Umschlag		Dauer	
		Landwind (Uhr)	Seewind (Uhr)	Landwind (Std)	Seewind (Std)
Entebbe	Dez.—Feb.	24.00...	9.00...	9	15
	Juni—Aug.	22.50...	9.20...	10,5	13,5
Kisumu	Dez.—Feb.	20.20...	8.40...	12,3	11,7
	Juni—Aug.	18.40...	9.20...	14,7	9,3
Mwanza	Dez.—Feb.	—	10.40	—	—
	Juni—Aug.	—	12.20	—	—

- g) BERSON u. ELIAS: Bericht über die aerologische Expedition des Königlichen Aeronautischen Observatoriums nach Ostafrika im Jahre 1908. Abhandl. Aeronaut. Obs. Lindenberg (Sonderband). Braunschweig 1910, enthält auch ausführliche Beschreibungen des Witterungsablaufes, insbesondere bei einer Überquerung des Sees von Shirati nach Bukoba.

Die Niederschlagsverteilung ist durch eine gute Karte im Maßstab 1:2 Mill. (h) gut belegt; diese Darstellung mußte in Abb. 4 nur ganz geringfügig geändert werden, um die Werte von Bufumbira (2290 mm) und Neuwied-Marienhof voll zu berücksichtigen.

- h) Mean Annual Rainfall Map of East Africa (1955).

Damit sind natürlich ältere Darstellungen — einschließlich der Karte von PAAP für das heutige Tanganyika (Arch. Dtsch. Seewarte 53, 3 (1934), gültig für die Periode 1907/08 bis 1912/13) — als überholt anzusehen.

### III. Tagesperiodische Windsysteme

Der Tagesgang der Bodenwinde ergibt sich zunächst in den extremen Jahreszeiten an den synoptischen Hauptstationen Entebbe, Kisumu und Mwanza aus Abb. 1, in der zugleich Näherungswerte der Beständigkeit in Prozenten im Stationskreis angegeben sind. Tabelle 2 faßt die Ergebnisse zusammen, wobei Andauer und Umschlagzeiten von See- und Landwind durch lineare Interpolation ermittelt wurden. Auf die regionalen Unterschiede — die bei Entebbe als Folge der Lage auf einer Halbinsel, bei Kisumu am Ende eines tiefen Golfes leicht zu verstehen sind — kann hier nur ganz kurz hingewiesen werden. In Mwanza setzt sich der Seewind im Südwinter erst relativ spät gegen den sehr kräftigen und beständigen SE-Passat durch; im Südsommer sind Beständigkeit und Intensität des Seewindes deutlich stärker.

In Shirati am Ostufer des Sees fand ELIAS [4] im August/September 1908 folgendes Verhalten: „Der Seewind hat nur eine verhältnismäßig geringe Dauer; er setzt gegen 11 Uhr

Tabelle 3. Zusammenfassung typischer Pilotballonaufstiege (Shirati, August 1908)

Höhe (m)	Landwind (~ 8 Uhr)					Seewind (~ 14 Uhr)				
	$\alpha$	$RV$	$SF$	$q$	$n$	$R$	$RV$	$SF$	$q$	$n$
1400	78°	3,6	3,8	96	12	285°	4,3	5,0	86	8
1900	79°	3,6	3,8	96	12	283°	2,7	3,7	75	7
2400	86°	3,5	3,7	93	9	157°	1,3	2,8	47	5
2900	99°	2,3	3,1	72	9	147°	1,8	3,1	58	5
3400	101°	1,9	3,4	57	9	145°	3,4	3,8	30	3

$\alpha$  = Richtung des resultierenden Windes (90° = E)  
 $RV$  = Resultierende Windgeschwindigkeit (m/sec)  
 $SF$  = Skalare Windgeschwindigkeit (m/sec)

$q$  = Beständigkeit (%)  
 $n$  = Anzahl der Aufstiege

Daneben wurden für das Gebiet des heutigen Tansania (Tanganyika) die Beobachtungen aus der deutschen Kolonialzeit vor dem Ersten Weltkrieg herangezogen; die Ergebnisse dieser z. T. sehr ausführlich veröffentlichten Beobachtungen passen ausgezeichnet in die neueren Daten und ergänzen diese an wichtigen Punkten.

- e) Deutsche Überseeische Meteorologische Beobachtungen Band 14—23 (1904—1913) enthält eine Extensio-Veröffentlichung der Klimabeobachtungen der Station I. Ordnung (z. T. mit ausgewerteten Registrierungen) Neuwied bzw.

ein und nimmt schon vor Sonnenuntergang fast bis zum Erlöschen ab, so daß er kaum 7 Std weht. Der Landwind dagegen tritt um 10 Uhr oder 11 Uhr abends auf und beginnt erst gegen 8 Uhr morgens abzuflauen, so daß seine Zeitdauer etwa 10 Std beträgt . . .“. Auch hier muß sich der Seewind gegen die allgemeine Strömung durchsetzen, die sich jedoch zu der nächtlichen Landbrise addiert. Eine Zusammenfassung typischer Pilotballonaufstiege zeigt Tabelle 3. Hierbei wurden Schichten von 500 m Mächtigkeit verwendet und einer mittleren Höhe zugeschrieben (mittlere Ortszeit der Aufstiege bei Landwind

8.30 Uhr, bei Seewind 13.50 Uhr); der eigentliche Seewind reicht hier nur bis 2200 m NN.

Eine regionale Darstellung und zahlenmäßige Abschätzung kann sich leider nur auf die Termine 6 Uhr und 12 Uhr GMT (8 Uhr und 14 Uhr Lokalzeit) stützen, da für 3 Uhr GMT (5 Uhr Lokalzeit) die Zahl der meldenden Stationen nicht ausreicht. Nach Abb. 1 ist 6 Uhr GMT — kurz vor dem Erlöschen der nächtlichen Landwindzirkulation — wohl kaum mehr ganz repräsentativ, entspricht aber an mehreren Stationen doch noch dem etwas verspäteten Nachtmaximum der Niederschläge. Der 12-Uhr-GMT-Termin ist dagegen für die Seewindzirkulation der Tagesstunden völlig repräsentativ. Die beiden Karten (Abb. 2—3) zeigen eindringlich die tagsüber herrschende Diffluenz des Seewindes nach allen Seiten, während in den Frühstunden des Südwinters die kräftige großräumige mittlere Luftströmung aus SE — ein Teil des südhemisphärischen Passatsystems, das in dieser Jahreszeit bis über den Äquator nordwärts ausgreift — die schwache Landbrise verschiedentlich verdeckt. Die Windbeobachtungen der beiden Klimastationen des ehemaligen deutschen Netzes passen trotz völlig anderer Periode (und des um 7 Uhr Lokalzeit gelegenen Frühtermins) recht gut in das homogene Beobachtungsmaterial der Periode 1951—1955 [11] hinein; sie wurden jedoch nicht zu der Divergenzberechnung (Kap. IV) herangezogen.

Da bei den Stationen Bukoba und Musoma die Beobachter nur zwei Klassen der Windgeschwindigkeit (Bft. 1—3 und 4—6) unterschieden haben, wurde hier — um vergleichbare Werte zu erhalten — eine statistische Verteilung der Windgeschwindigkeiten entsprechend dem Mittel der anderen Stationen angenommen. Die Berechnung der mittleren Süd- und Westkomponente des resultierenden Windes, der mittleren skalaren Windgeschwindigkeit und Beständigkeit erfolgte in der üblichen Weise.

Das Vorkommen ähnlicher tagesperiodischer Windsysteme an den anderen großen ostafrikanischen Seen ist zu erwarten. Die in den großen Gräben gelegenen Seen (Nyassa, Tanganyika, Albert- und Rudolf-See als Beispiele) sind zwar alle wesentlich länger als breit, aber bei ihnen kommt noch an vielen Stellen der Effekt des umliegenden Berglandes hinzu, so daß hier das ganze Jahr über die tagesperiodischen Winde völlig dominieren. Einige Beispiele sind in Tabelle 4 zusammengestellt, wobei die alte deutsche Reihe von Bujumbura (früher Usumbura) am Nordrande des Tanganyika, die auch den 21-Uhr-Termin enthält, als besonders charakteristisch erscheint. Allgemein ist die Beständigkeit des Seewindes um 14 Uhr größer als die des nächtlichen Landwindes zum Frühtermin; umgekehrt verhält sich Kigoma, wo aber im Einflußbereich der ganzjährigen kräftigen passatischen Ostströmung die nächtlichen Landwinde verstärkt werden.

Die in den Morgenstunden herrschende Konvergenz der Lokalwinde über dem Victoria-See führt zur Ausbildung eines permanenten Tiefs, das besonders um 6 Uhr GMT im 850-mb-Niveau gut ausgeprägt ist (15, Fig. 13.2 sowie 16, Fig. 5 A). Nachmittags bildet sich über dem Victoria-See eine anticyclonale Krümmung der Isobaren aus, während sich das Tief nach dem Kenya-Hochland verlagert (16, Fig. 5 B).

#### IV. Divergenz und Vertikalbewegung

Zur Abschätzung der Divergenz der Bodenwinde — zu der nur das homogene 5jährige Material [10] verwendet wurde — dient ein Vieleck, das die Fläche des Sees möglichst gut annähert (vgl. Abb. 2 u. 3), mit optimaler Übereinstimmung von Umriß und Flächengröße. Die Annahme einer linearen

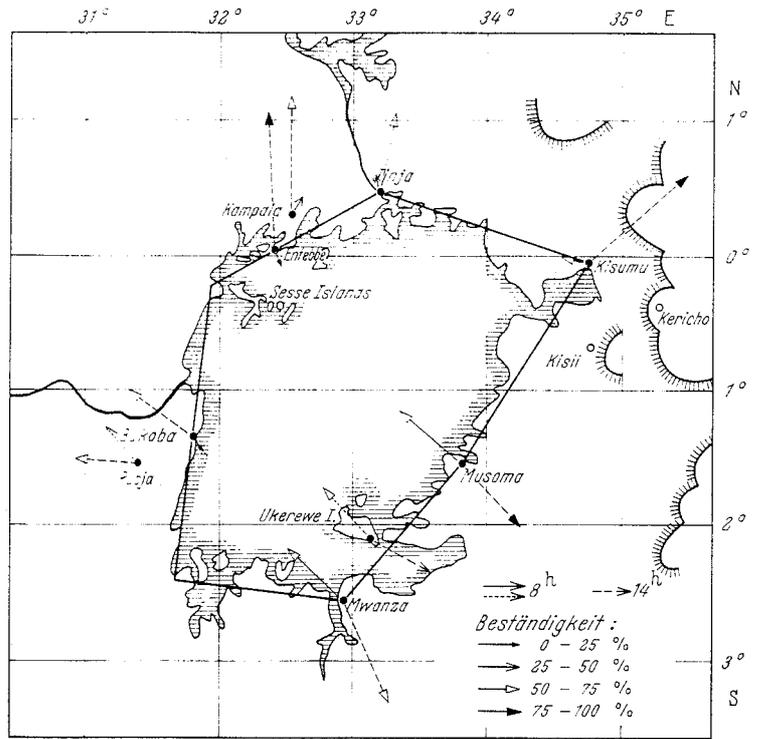


Abb. 2. Tageszeitenwinde um 8 und 14 Uhr Ortszeit für Dezember—Februar

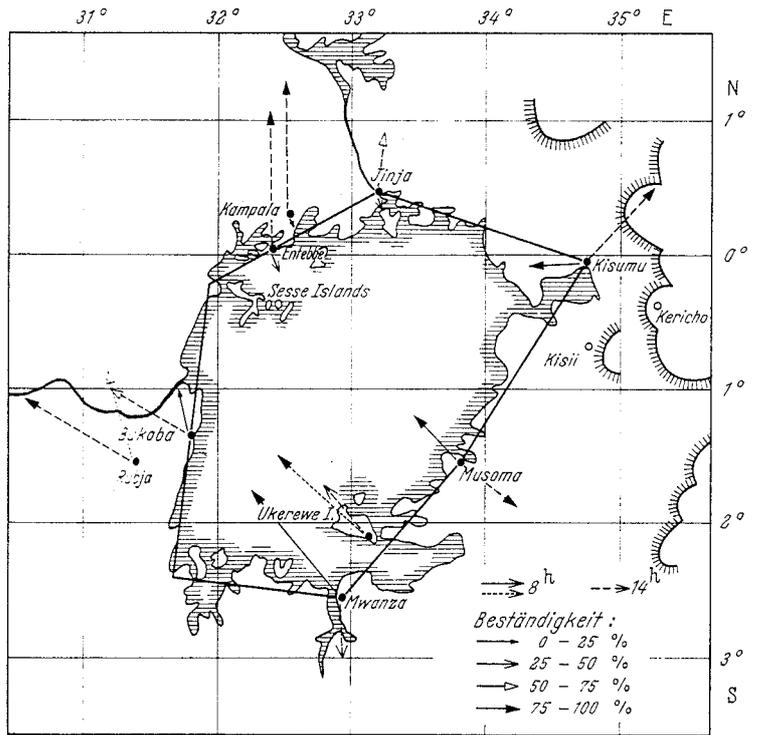


Abb. 3. Tageszeitenwinde um 8 und 14 Uhr Ortszeit für Juni—August

Tabelle 4. Resultierende Land- und Seewinde (Ortszeit) an anderen Seen Ostafrikas

		Juni—August		Dezember—Februar	
		$\alpha$	q	$\alpha$	q
Butiaba (Albert-See)	8 Uhr	75°	50%	122°	36%
	14 Uhr	258°	62%	243°	67%
Kigoma (Tanganyika)	8 Uhr	96°	94%	90°	73%
	14 Uhr	237°	83%	256°	49%
Bujumbura (Tanganyika)	7 Uhr	35°	56%	29°	36%
	14 Uhr	217°	93%	214°	68%
	21 Uhr	64°	54%	51°	37%

Änderung der Windkomponenten zwischen zwei Stationen längs der Abschnitte des Vielecks erscheint für unseren Zweck genügend realistisch; sie erleichtert wesentlich die Berechnung des Vektorflusses und der Divergenz. Bezeichnen wir den horizontalen resultierenden Windvektor als  $\vec{v}$  ( $v_x, v_y$ ), die Linienelemente der Umrandung  $L$  als  $dL$ ; so ergibt sich der mittlere horizontale Vektorfluß längs eines Linienelementes

$$S_i = |\vec{v}| dL \cos \alpha$$

mit dem Winkel  $\alpha = (\vec{v}, dL_n)$  zwischen  $\vec{v}$  und der äußeren Normale auf  $dL_i$ . Für die von  $L = \sum_i dL_i$  umrandete Fläche  $F$  ergibt sich dann die horizontale Divergenz  $\nabla_h \cdot \vec{v}$  des Windfeldes zu

$$\nabla_h \cdot \vec{v} = \frac{1}{F} \sum S_i.$$

Unter der Voraussetzung, daß sowohl die zeitliche Dichteänderung  $d\rho/dt$  als auch der horizontale Gradient  $\nabla_h \rho$  vernachlässigbar klein sind — beides trifft für klimatologische

Aus Tabelle 5 ergibt sich, daß die Größe der horizontalen Divergenz des Windfeldes und die sich hieraus ergebende vertikale Windkomponente erwartungsgemäß mit der Tageszeit ihr Vorzeichen wechselt, aber in den entgegengesetzten Jahreszeiten ziemlich konstant ist. Die südhemisphärische Trockenzeit in den Monaten Juni—August, die für den Victoria-See

Tabelle 5. Tagesperiodische Divergenz und Vertikalkomponente des Windes über dem Victoria-See

	Juni—August		Dezember—Februar	
	8 Uhr	14 Uhr	8 Uhr	14 Uhr
Divergenz Boden	-1,85	-3,26	-1,35	-3,60 · 10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>
Vertikalkomponente:				
Modell I (2500 m)	-2,53	-4,45	-1,84	-4,91 cm s <sup>-1</sup>
Modell II (3500 m)	-4,38	-7,71	-3,19	-8,51 cm s <sup>-1</sup>

als Ganzes eine dominierende Rolle spielt, kommt in der Divergenz der Lokalwinde nicht zum Ausdruck, obwohl sie in den Regenmengen und -häufigkeiten und in den Gewitter-

Tabelle 6. Klimatabelle für die Insel Ukerewe (Mai 1904 bis Dezember 1913)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
Temperatur, tägliches Maximum (°C)	27,4	27,5	28,0	26,2	26,8	27,4	27,4	27,4	28,4	28,5	27,3	26,8	27,4
Temperatur, tägliches Minimum (°C)	18,0	18,1	18,5	17,9	17,8	17,2	16,6	17,2	18,0	18,4	18,2	17,8	17,8
Regentage $\geq 0,0$ mm	12	12	15	21	14	5	3	9	7	11	18	17	144
Regentage $\geq 0,1$ mm	10	10	14	20	11	3	2	6	5	8	15	15	119
Regentage $\geq 1,0$ mm	9	8	11	19	9	2	2	5	4	6	11	11	97
Regentage $\geq 2,5$ mm	6	6	8	14	8	2	1	4	3	5	9	9	75
Tage mit $\bar{\alpha}$ , T oder $\zeta$	17	16	20	22	19	8	9	14	14	19	20	18	196
Relative Feuchte (%) 7, 14, 21 Uhr	75	76	75	81	75	67	64	71	68	70	75	77	73
Relative Feuchte (%) 14 Uhr	60	61	59	68	58	49	46	55	51	54	61	64	57
Sonnenscheindauer Std./Tag	7,5	7,3	8,0	7,2	8,9	8,8	8,5	7,5	8,3	8,1	7,2	7,0	7,9

Zwecke in Äquatornähe zu —, läßt sich die Vertikalbewegung  $v_z$  aus der Kontinuitätsgleichung berechnen, sofern man eine Annahme über die vertikale Verteilung von  $\nabla_h \cdot \vec{v}$  für die Schicht zwischen der Erdoberfläche und  $z$  macht:

$$v_z = - \int_{z_0}^z \nabla_h \cdot \vec{v} dz.$$

Da nach COCHENÉ [15] die lokale Konvergenz in 2400 m Höhe über dem Victoria-See normalerweise verschwindet, und die Strömung in 700 mb ( $\sim 3150$  m) ziemlich ungestört zu sein scheint, gehen wir von zwei Annahmen aus:

a)  $\frac{\partial}{\partial z} (\nabla_h \cdot \vec{v}) = \text{const.}$

für das Höhenintervall  $dz$  zwischen  $z_0 = 1134$  m (Seespiegel) und  $z$ ,

b)  $\nabla_h \cdot \vec{v}|_{z=0} = 0$  für  $z = 2500$  m (Modell I)  
 $z = 3500$  m (Modell II)

Modell II ergibt sich aus den Angaben von BERSON u. ELIAS [4]; es dürfte die höchsten noch vertretbaren Werte liefern. Die Annahme a) führt vermutlich zu etwas zu großen Werten von  $v_z$ , da die vertikale Änderung der Divergenz unmittelbar über der Oberfläche am größten ist und nach oben eher geringer wird. Die Ergebnisse der Berechnung (Tabelle 5) zeigen, daß der absolute Betrag der Divergenz in den Mittagsstunden zwei- bis dreimal so groß ist wie der der Konvergenz in den Morgenstunden. Ob der 8-Uhr-Termin allerdings für die nächtliche Landwindzirkulation auch zahlenmäßig noch als voll repräsentativ gelten kann, ist unsicher. Daß die nächtlichen tagesperiodischen Winde im allgemeinen deutlich schwächer sind als die tagsüber wehenden, ist eine bekannte Erfahrungstatsache; die Ursache liegt in den geringeren horizontalen Unterschieden im Wärmehaushalt in den Nachtstunden. Die nach Modell I berechneten Werte  $v_z$  erscheinen mit  $\pm 2-5$  cm s für eine Fläche von der Größenordnung  $10^5$  km<sup>2</sup> als hoch, aber nicht unrealistisch; sie entsprechen durchaus den bei synoptischen Prozessen ermittelten Werten. Dasselbe gilt für die Größenordnung der Divergenz, die bekanntlich stark von der Skala, d. h. von dem horizontalen Abstand der verwendeten Stationen abhängt.

statistiken südlich von etwa 1°S — also in dem größeren südlichen Abschnitt des Sees — eindeutig ausgeprägt ist (Tabelle 6). Der Wasserspiegel erreicht seinen Höchststand im Mai—Juni, d. h. nach Ende der großen Regenzeit (März bis Mai), dann fällt er vom Juni bis Oktober im Durchschnitt um 28 cm in 4 Monaten, d. h. um etwa 2,5 mm pro Tag, während er in der großen Regenzeit in 2 Monaten um 30 cm (5 mm pro Tag) ansteigt. Diese Beträge stellen ein räumlich-zeitliches Integral der Differenz zwischen Niederschlag und (aktueller) Verdunstung für das gesamte Einzugsgebiet dar. Die in den Veröffentlichungen des East African Meteorological Department gegebenen Gebietsmittel des Niederschlags sind ohne Berücksichtigung der ganz ungleichmäßigen — mit der Bevölkerungsdichte zunehmenden — Stationsdichte gemittelt und sind daher für den hier sehr variablen Jahresgang des Niederschlags keinesfalls genügend repräsentativ.

Andererseits muß aber beachtet werden, daß sich der tageszeitlichen Periodik der lokalen Windsysteme wettermäßig und jahreszeitlich veränderliche großräumige Windsysteme überlagern, die auch für die vertikale Stabilität der Schichtung und damit für die vertikale Verteilung der gesamten Divergenz und die resultierende Vertikalkomponente des Windes entscheidend sind. Die südwinterliche Trockenzeit ist charakterisiert durch stabile Schichtung mit flacher Stratocumulusbewölkung, vielfach an niedrigen Inversionen: eine solche Stabilisierung bei überlagerter Divergenz ist charakteristisch für großräumige Windsysteme, die sich mit meridionaler Komponente dem Äquator nähern, sofern nicht die Abnahme der Geschwindigkeit längs der Stromlinien die — auf  $\beta = df/dy$  ( $f = 2 \Omega \sin \varphi$ ) zurückführende [17] — horizontale Ausbreitung überkompensiert. Damit addiert sich aber die überlagerte großräumige Divergenz — mit ihren synoptisch und jahreszeitlich bedingten Schwankungen — unserer tagesperiodischen Divergenz, und die Modellannahme einer linearen Abnahme der Divergenz auf 0 in einer konstanten Höhe wird hinfällig. Die in Tabelle 5 gegebenen Werte beziehen sich daher nur auf den tagesperiodischen Effekt und vernachlässigen notwendig alle wettermäßigen Schwankungen und alle jahreszeitlichen Änderungen der dreidimensionalen Struktur des Wind-, Temperatur- und Feuchtfeldes.

Ein Beleg für diese Rolle synoptischer Vorgänge ist die relativ geringe Häufigkeit der Gewitter: selbst in der Hauptregenzeit (etwa im April) steigt die Häufigkeit von Tagen mit Gewitter an einer Station im Mittel nicht über 20 bis 22 pro Monat an, so daß ein Drittel aller Tage gewitterfrei bleibt. Die an einer Station gemeldeten Gewitter beziehen ja auch alle die Fälle ein, bei denen nur der Donner gehört wird; unsere Statistik für Ukerewe bezieht sogar die zahlreicher Fälle von Wetterleuchten (Ferngewitter) ein, die die sehr sorgfältig beobachtenden Missionare aufgezeichnet haben.

V. Niederschlagsverteilung

Die mittlere jährliche Niederschlagsverteilung (Abb. 4) auf dem Victoria-See ist — mit Ausnahme der zentralen Zone um 1°S, 33°E — verhältnismäßig gut belegt durch eine Reihe von Niederschlagsstationen auf den Inseln (Sesse, Kome, Ukerewe), deren Reihen zwar nur selten so lang sind wie die der Hauptstationen an der Küste, aber doch genügend homogen, um die mittlere Jahresmenge mit einer Unsicherheit von einigen Prozenten abschätzen zu können (Tabelle 7). Leider sind bisher homogene, auf eine bestimmte Periode (z. B. 1931—1960) reduzierte Mittelwerte nicht verfügbar, obwohl das Stationsnetz hierzu offenbar ausreichend dicht wäre; die Streuung der Jahreswerte ist nicht gering. Die auffälligste Tatsache ist das Maximum der Regen mit bis 2290 mm auf den Sesse-Inseln im Nordwestquadranten des Sees, wobei die 2000-mm-Isohyete eben bei Bukoba die Küste streift. Die 1500-mm-Isohyete nimmt auf dem See etwa 60% der gesamten Fläche ein, während sie über Land nur im Bereich der Hochländer im Osten und Nordosten in begrenzten Flecken auftritt. Nur längs der Ostküste finden wir eine Trockenzone mit Werten von 700 bis 800 mm; im Südosten dagegen nimmt über Land die Jahresmenge rasch auf Werte bis 500 mm ab. Das Gefälle der Isohyeten ist über dem See eindeutig nach außen gerichtet: über dem See liegt ein breites, nach Westen verschobenes Maximum der Niederschläge, das anscheinend höher ist als das der Hoch-

länder im Osten, obwohl diese absolut bis über 3000 m Höhe, relativ um mehr als 2000 m über dem Seespiegel ansteigen.

Eine Planimetrierung der Niederschlagskarte (Abb. 4) liefert einen mittleren Jahresniederschlag auf dem See von 145 cm, wobei das Maximum im Westen durch die Minimumzone im

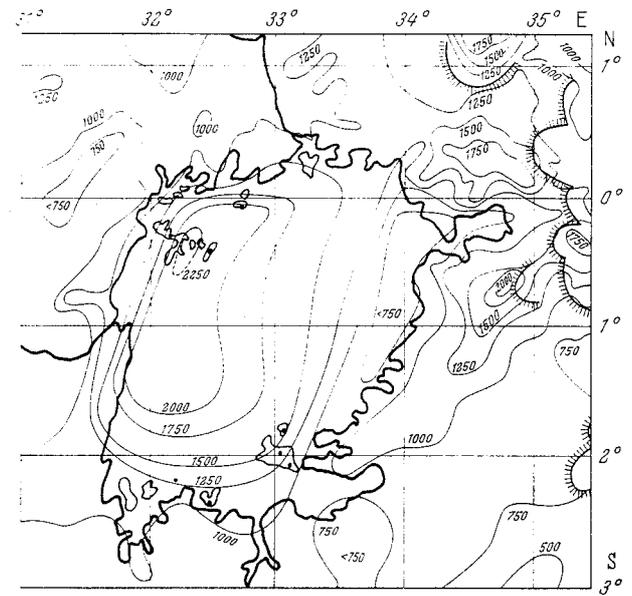


Abb. 4. Mittlere jährliche Niederschlagsverteilung

Osten — im Lee des Hochlandes bei der allgemeinen Ostströmung in der mittleren Troposphäre — etwa ausgeglichen wird. Bildet man einen Mittelwert längs der Umrandung, so erhält man abgerundet 126 cm, wobei der Ost- und Südrand mit 98 bzw. 102 cm natürlich erheblich trockener sind als der

Tabelle 7. Monats- und Jahresmittel des Niederschlages (mm), Victoria-See (bis 1964)

	φ (S)	λ (E)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr	n	
a) Küste																	
Kisumu	0,1°	34,8°	47	74	137	190	153	85	58	76	65	54	86	96	1121	60	
Maseno, Asemba	0,2°	34,4°	39	58	135	176	139	62	59	62	84	43	109	91	1060	23	
Shirati	1,1°	34,0°	52	57	94	169	114	39	17	34	27	50	122	74	849	13	
Musoma	1,5°	33,8°	63	66	118	172	112	24	22	19	26	38	84	70	815	42	
Bukoma	1,9°	33,4°	48	66	143	176	123	44	10	25	36	78	147	144	1042	7	
Mwanza	2,5°	32,9°	96	101	152	154	91	18	12	18	39	61	123	145	1011	38	
Nungwe Bay	2,8°	32,0°	87	84	98	196	85	6	3	18	41	77	144	116	955	14	
Katoke	1,7°	31,7°	140	113	194	292	160	42	27	86	98	104	153	168	1576	14	
Bukoba	1,3°	31,8°	150	156	246	370	318	84	51	81	107	133	176	192	2064	43	
Katera, Sango Bay	0,9°	31,6°	81	88	155	226	204	33	22	22	60	82	99	103	1191	34	
Nkozi	0,0°	32,0°	48	51	112	167	139	57	28	64	78	88	120	86	1040	27	
Entebbe	0,1°N	32,5°	72	87	159	266	245	114	72	80	77	94	133	118	1513	67	
Buvuma Isl.	0,2°N	33,3°	98	108	192	248	254	97	68	67	72	94	149	143	1592	30	
b) Inseln																	
Lwazimirule, Kome I.	0,1°	32,8°	130	116	213	305	315	160	125	98	102	131	216	212	2123	17	
Bumangi, Sesse I.	0,3°	32,2°	110	126	192	301	295	147	82	103	91	101	184	150	1864	22	
Kalengala, Sesse I.	0,3°	32,3°	122	143	238	340	324	188	114	108	105	124	183	198	2188	37	
Bufumira, Sesse I.	0,3°	32,4°	137	165	259	343	337	173	115	114	126	125	206	190	2290	20	
Bukasa, Sesse I.	0,4°	32,5°	134	143	212	250	273	167	154	140	119	124	212	181	2138	17	
Ukara, Ukerewe I.	1,8°	33,0°	138	162	204	262	184	66	66	59	72	94	151	187	1645	23	
Neuwied, Ukerewe I.	2,0°	33,0°	124	99	140	329	94	25	13	76	39	95	137	157	1328	9	
Nansio, Ukerewe I.	2,1°	33,1°	114	122	155	152	116	19	20	28	35	55	93	181	1120	11	
Ukurukuss	2,2°	32,2°	99	122	139	173	119	20	20	55	102	126	197	124	1297	10	
Kome	2,3°	32,5°	80	90	148	163	75	18	23	43	74	111	119	117	1059	31	
c) Hinterland																	
	φ (S)	λ (E)	H														
Tororo	0,7°N	34,2	1228	52	69	138	227	222	106	100	119	105	119	103	80	1441	35
Kakamega	0,3°N	34,7	1350	59	88	152	252	244	190	172	237	184	125	110	90	1924	43
Kericho	0,4°	35,3	1980	69	93	154	269	252	160	132	184	136	136	120	95	1350	59
Kisii, Murumba	0,6°	34,8	1920	81	80	172	314	281	197	128	203	210	168	170	136	2141	22
Nyabassi	1,4°	34,6	1830	102	100	139	192	162	64	51	69	115	105	137	153	1387	18
Ukinguru	2,7°	33,0	1199	97	82	124	136	75	9	1	12	24	47	119	113	838	26
Ngudu	2,9°	33,4	1220	87	93	134	151	66	9	3	4	13	30	101	129	819	33
Shanwa	3,2°	33,8	1340	108	103	129	150	49	4	0,5	2	10	30	86	134	807	36
Geita Gold Mine	2,9°	32,2	1292	103	97	136	167	81	13	2	17	45	74	136	136	1008	28
Biharamulo	2,6°	31,3	1480	94	105	149	194	87	10	4	21	33	67	100	119	976	40
Igabiro	1,8°	31,5	1520	95	106	161	196	115	19	10	25	61	89	109	123	1109	35
Masaka	0,3°	31,7	1313	56	65	117	152	174	48	36	53	87	98	98	84	1098	46
Kasugama	0,1°	31,1	1310	32	42	80	106	68	20	37	58	81	82	104	58	767	24
Einzugsgebiet <sup>2</sup>				65	68	124	193	169	91	87	118	100	98	126	96	1334	

<sup>1</sup> 1904—1913 <sup>2</sup> Mittel aus 292 Stationen, ungleichmäßig verteilt. n = Anzahl der Jahre

Westrand (156 cm) und der Nordrand (137 cm). Der Mittelwert für das gesamte Einzugsgebiet — 133 cm nach Quelle b) — ist leider nicht genügend repräsentativ; der wahre Wert dürfte eher unter als über 125 cm liegen. Diese Verteilung ist auffällig genug: weshalb liegt das Maximum ausgerechnet über dem See, d. h. an der orographisch tiefsten Stelle?

Der Jahresgang der Niederschläge ändert sich in Äquatornähe rasch, wobei die Abhängigkeit von der Breite dominiert. Unsere Daten müssen — da zeitlich nicht homogen — sehr vorsichtig interpretiert werden; Unterschiede zwischen zwei benachbarten Monaten sind noch in 30jährigen Mittelwerten nicht stabil. An der Nordküste — also am Äquator selbst — finden wir im Mittel zwei Regenzeiten: die „langen Regen“ im März—Mai, die „kurzen Regen“ (weniger intensiv) im November/Dezember; das Minimum der Regen fällt im Mittel auf Januar oder Juli. Betrachtet man aber die Einzeljahre, so stellt man erhebliche Variationen fest: die beiden Regenzeiten und Trockenzeiten unterliegen nach Beginn, Ende und Intensität deutlichen Schwankungen. Das gilt auch im westlich benachbarten Hochland um Fort Ternan und Kericho, wie dort lang ansässige Farmer bestätigen. Während nach Norden zu der Nordwinter die Rolle der Haupttrockenzeit übernimmt, gilt dies nach Süden hin für den Südwinter: bereits in 2—3° Südbreite beherrscht eine regelmäßige Trockenzeit in den Monaten Juni—August das Bild, die an der Südküste des Sees fast regenlos ist. Dagegen nimmt die kleine Trockenzeit im

(vgl. [18] Abb. 10). Auffallend ist jedoch gerade hier die rasche Änderung mit der Breite (Tabelle 7).

In verschiedenen Regionen sind jedoch die Trockenzeiten auffällig schwach ausgebildet oder fehlen völlig. Das gilt einmal für das Bergland im Osten, d. h. für den Abhang des Hochlandes zwischen Victoria-See und dem ostafrikanischen Graben: in Kakamega oder in Kericho fällt die Trockenzeit im Südwinter praktisch aus. Noch stärker gilt das für die im Nordwestquadranten liegenden Sesse-Inseln und Kome-Inseln: hier fallen nicht nur die überhaupt größten Niederschlagsmengen (noch etwa 10% mehr als in Bukoba an der Westküste), sondern in beiden Trockenzeiten liegen die Monatsmittel fast ohne Ausnahme über 100 mm, wobei die 37jährige Reihe von Kalengala wohl als wirklich repräsentativ gelten muß.

Vergleicht man in jedem Monat die Daten räumlich, etwa durch Auswahl der drei höchsten Werte, so ergibt sich, daß nur in den Monaten August—Oktober die absoluten Höchstwerte in den Kenya-Hochländern im Osten liegen; im Juni—Juli erhalten diese etwa die gleichen Mengen wie die Sesse-Inseln. In den sieben Monaten von November bis Mai fallen die höchsten Mengen im Bereich der Sesse-Inseln, bei Bukoba und (nur im Dezember—Februar) auf der im Süden gelegenen Insel Ukereve. Mit Ausnahme der Monate August—Oktober erhält also offenbar die Westhälfte des Victoria-Sees auf den flachhügeligen Inseln die Maximalwerte des ganzen Gebietes, mehr als die bis 3000 m ansteigenden Hochländer.

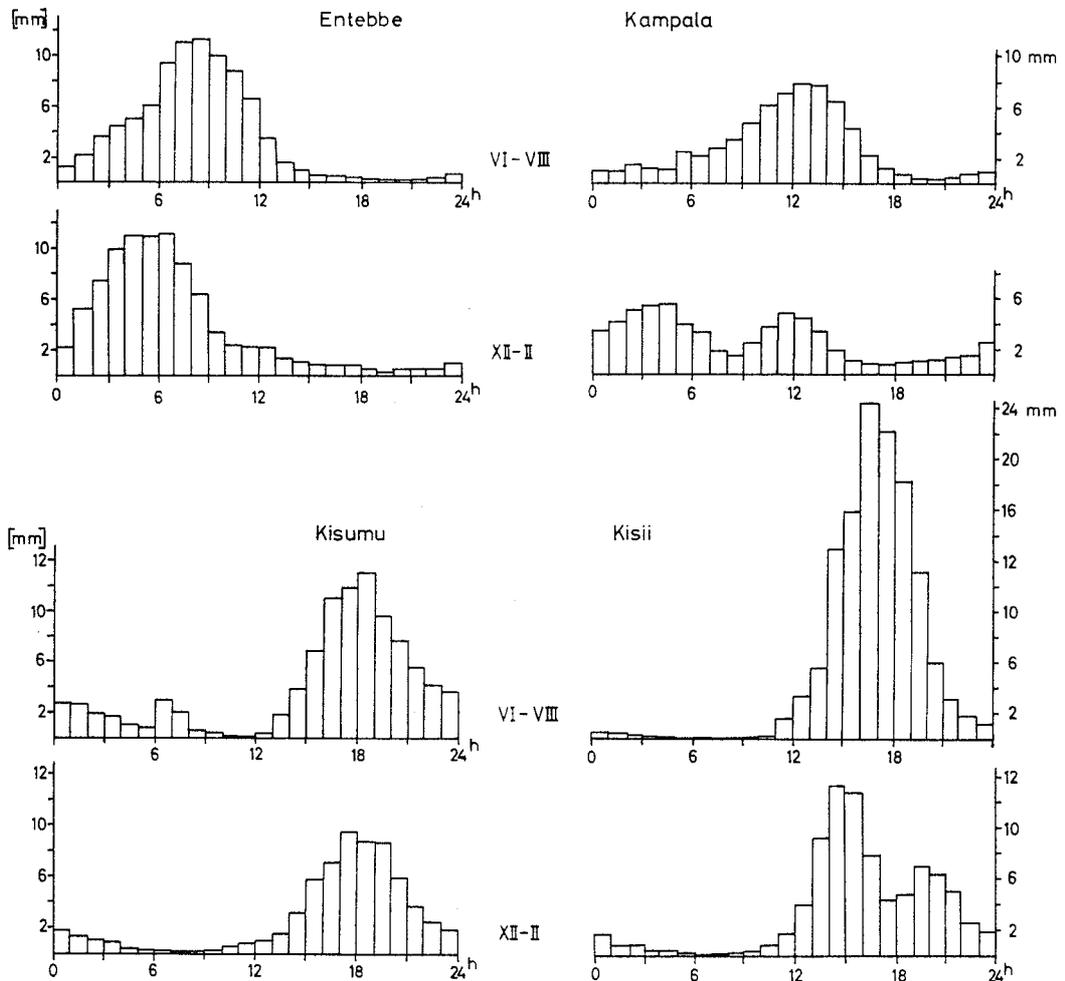


Abb. 5. Tagesgang des Niederschlags für vier Stationen (nach THOMPSON)

Januar—Februar rasch an Bedeutung ab; sie kann im Einzeljahr ganz fehlen und bleibt nur noch in langjährigen Mittelwerten erkennbar.

Dieses Bild entspricht etwa dem klassischen Schema der doppelten Regenzeiten in der Äquatorialregion, die nach beiden Seiten hin polwärts zu einer Sommerregenzeit verschmelzen

#### VI. Tagesgang der Niederschläge und Bewölkung

Es liegt nahe, diese Form der Regenverteilung auf die nächtliche Konvergenz der Bodenwinde zurückzuführen, die wir oben abgeleitet haben: dies wäre ein Analogon zu den weit verbreiteten Niederschlagsmaxima über isolierten tropischen und subtropischen Gebirgen, die [12, 13] als Folge der tags-

über sich ausbildenden Konvergenz der Hangwindssysteme mit Nachmittagssechauern zu interpretieren sind. Um diese Hypothese nachprüfen zu können, benötigen wir aus dem Bereich der Inseln (einschließlich der Westküste bei Bukoba) noch Statistiken über den Tagesgang der Niederschläge.

Diese sind hier für vier Stationen des ostafrikanischen Netzes nach THOMPSON [10] gegeben (Abb. 5). Eine zusammenfassende Karte über den Anteil der Nachmittagsregen (12—18 Uhr) hat auch SANSON (16. Fig. 4) gegeben. Hierbei repräsentiert Entebbe auf einer Halbinsel in etwa den „maritimen“ Gang (Maximum Dezember—Februar 4—7 Uhr, Juni—August 7—9 Uhr); die Verspätung im Südwinter hängt wohl mit der allgemeinen S-SE-Strömung dieser Jahreszeit zusammen, die das nächtliche Konvergenzgebiet nach N ausgreifen läßt. Kampala liegt (nur etwa 30 km nördlich Entebbe) in einem Übergangsbereich; das Hauptmaximum im Nordwinter entspricht dem von Entebbe. Jedoch zieht in beiden Jahreszeiten gegen 12 Uhr eine Art Seewindfront durch, die im Nordsommer das Hauptmaximum liefert, und mit etwa 2—3 m/s landeinwärts fortschreitet. Sie konnte in den Nachmittagsstunden etwa 80—100 km nördlich des Sees mit zahlreichen Quellungen — die jedoch kaum über 4500 m (~ Nullgradgrenze) reichten — und Schauern vom Flugzeug aus beobachtet werden (Dezember 1959).

Kisumu im Winkel des tief ins Land eingreifenden Golfes und vor allem Kisii im Hinterland zeigen den typisch „kontinentalen“ Verlauf mit einem Maximum in den späten Nachmittagsstunden (16—18 bzw. 15—19 Uhr). Nur bei Kisumu tritt im Nordsommer um 6 Uhr früh ein kleines Nebenmaximum auf, vielleicht eine schwache Andeutung einer lokalen Landwindkonvergenz des Kavirondo-Golfes.

Die sehr sorgfältigen Aufzeichnungen der deutschen Missionsstation auf Ukerewe (1904—1913) erlauben eine Auswertung der Tagesperiode der Häufigkeit von Gewitter, Wetterleuchten, Donner und Regen, die über das ganze Jahr hin bemerkenswert konstant ist und die Daten der Niederschlagsregistrierungen [10] an einem wichtigen Punkt ergänzt (Abb. 6). Sie beruht auf den veröffentlichten Witterungsnotizen (Quelle e).

Gewitter treten am häufigsten auf zwischen 4 und 7 Uhr, sowie mit etwa der halben Häufigkeit abends zwischen 17 und 21 Uhr; das Minimum liegt mittags zwischen 12 und 16 Uhr. Bei Wetterleuchten (d. h. Ferngewittern) finden wir zwei Maxima um 4—5 Uhr und viel stärker um 17—21 Uhr; das Minimum tagsüber hängt wohl mit der Sichtbarkeit zusammen, das nächtliche mit der Tagesperiode der Aktivität freiwilliger Beobachter. Donner (d. h. Nahgewitter) wird am häufigsten früh (4—7 Uhr) gehört, während der Abendgipfel (17—19 Uhr) wesentlich schwächer ist. Regen hat einen sehr ausgeprägten breiten Gipfel um 4—10 Uhr; ein sekundärer Abendgipfel (20—21 Uhr) ist nur ganz unbedeutend.

Bei Berücksichtigung der topographischen Lage erkennt man, daß hier offenbar zwei Vorgänge miteinander alternieren: die auf der Seefläche erzeugte Nachtkonvektion mit dem Maximum der Gewitter und Regen um Sonnenaufgang (6 Uhr), und die über dem benachbarten Land produzierte, bis in die Abendstunden hinein anhaltende Nachmittagskonvektion mit einem Maximum gegen Sonnenuntergang (18 Uhr). Während die nächtliche Zirkulation sich auf der Insel Ukerewe frühmorgens durch massive Regenfälle und Nahgewitter auswirkt, wird die Tageszirkulation nur durch Ferngewitter am Ost-Horizont angezeigt<sup>1</sup>.

Für Shirati (Juli—September 1908) schildert ELIAS [4] die Bildung von Cu und Cb ab Mittag über Land im Osten, und die Gewitter gegen Sonnenuntergang, die dann um etwa 23 Uhr

<sup>1</sup> Bei der Station Ukerewe fällt auf, daß im Jahresmittel Sonnenscheindauer  $S$  (7,9 Std = 66% der möglichen) und Bewölkung  $B$  (7 Uhr: 84, 14 Uhr: 89, 21 Uhr: 56, 7—14 Uhr: 82%) sich scheinbar widersprechen:  $S = B = 148\%$ ! Die üblichen Beobachtungsfehler (Überschätzung der horizontalen Bewölkung, volle Berücksichtigung der der Sonnenstrahlung kaum behindernden Cirren gerade bei aufmerksamen Beobachtern, Unterbewertung der durch Konvektionsbewölkung bedingten Lücken in der Sonnenscheinregistrierung des Campbell-Stokes-Autographen) erklären diesen Befund höchstens teilweise. Vermutlich wirkt sich hier die auch tagesperiodische Verlagerung der Bewölkung aus: früh starke Bewölkung im Westen, aber wolkenarm im Osten, nachmittags umgekehrt.

mit dem „Durchbruch“ des Landwindes auf See hinausdriften. Frühmorgens sind nur noch in weiter Entfernung auf dem See — jenseits der Trockenzone in Abb. 4 — Cumulusköpfe mit elektrischen Entladungen sichtbar. Andererseits werden auch bei den alten Beobachtungen in Bukoba (Quelle f) die in den frühen Morgenstunden (5—8 Uhr) auftretenden, dann westwärts ziehenden Gewitter beschrieben.

Die auf wenige Tage beschränkten Beobachtungen des einen von uns (Fl.) ergaben — in einer relativ trockenen Periode —

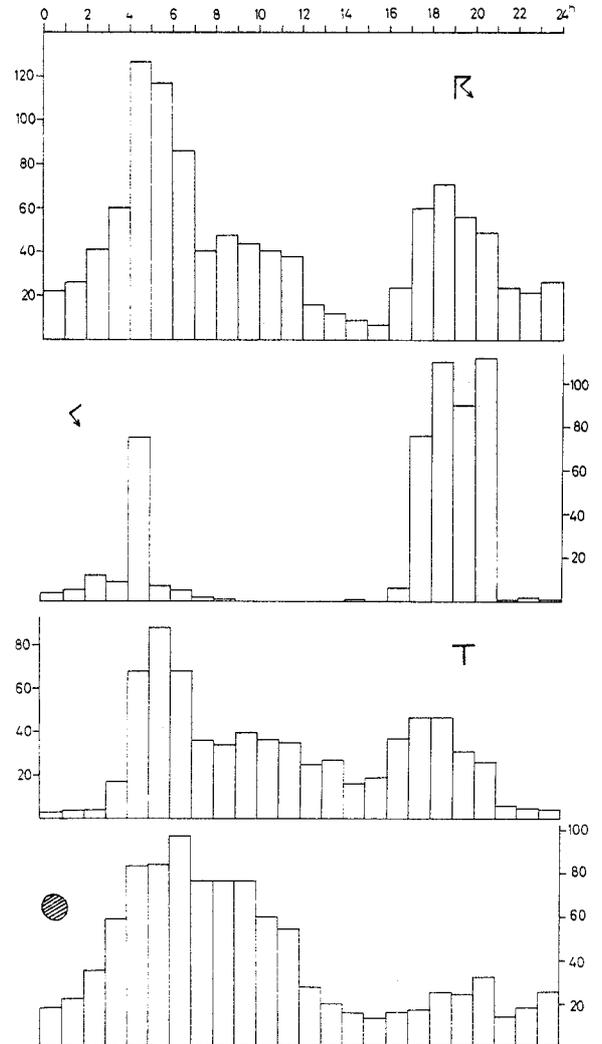


Abb. 6. Tagesgang der Häufigkeit von Regen, Gewitter und Wetterleuchten für Ukerewe (1904—1913), Jahr

die Existenz ausgedehnter Sc-Felder über See gegen Sonnenaufgang, das Fehlen von Wolken über See in den Mittagsstunden sowie die abendlichen Gewitter über Land; auf die Existenz einer Seewindfront im Nordwinter (zwischen der großräumigen Strömung aus N—NNE und dem Seewind der Nordküste) wurde schon hingewiesen. Fliegerbeobachtungen scheinen das häufige Auftreten von Gewitterzellen in den Morgenstunden, die bis an die äquatoriale Tropopause oder gar darüber hinaus (bis 60000 Fuß = 18 km) reichen, zu bestätigen.

Eine eindrucksvolle Repräsentation der Wolkenverteilung zur Zeit der Ausbildung der mittäglichen Seewindzirkulation liefert eine Aufnahme des Nimbus-L-Satelliten vom 3. 9. 1964, 0921 Z entsprechend 1137 Ortszeit (Abb. 7). Diese Aufnahme der zentralen Kamera umfaßt knapp 30 Quadratgrad oder rund 360000 km<sup>2</sup>, wobei im Original noch Objekte von < 0.1 mm Durchmesser (entsprechend ~ 1200 m) zu erkennen sind. Hier ist die Nord- und Osthälfte des Sees wolkenlos, ebenso auch der (im Original gut zu erkennende) Kavirondogolf,

während über dem zentralen See und der Westküste noch ausgedehnte Wolkenmassive liegen, im E zum Teil scharf-randig begrenzt, aber nach S und W unscharf-faserig wie ein Cirrenschleier verlaufend. An den Ost- und Nordküsten bilden sich unmittelbar über dem Ufergelände kleinräumige Cu-Zonen aus, während der Nordteil des großen Wolkenmassivs im W über Land sich offenbar in engräumige Konvektionszellen aufgelöst hat. Die beiderseitige Konvergenz der Hangwinde bildet in den Hochländern im Osten (35,3—36°E) eine langgestreckte, komplexe Wolkenzone aus, und besonders deutlich tritt die ovale Wolkenkappe des Mt. Elgon (etwa 34,5°E, 1,2°N) hervor; der ostafrikanische Graben mit seinen Abzweigungen ist

hälfte des Sees, so daß die Küstenstation Bukoba noch einbezogen wird. Im Einzelfall gibt eine Aufnahme des Nimbus-I-Satelliten eine ähnliche Anordnung wieder. Tagsüber ist die Seefläche über dem Einfluß der allseitig divergierenden Seewinde wolkenarm bis heiter. Der Tagesgang der Niederschläge — Maximum nachts und frühmorgens auf dem See, nachmittags und abends über Land —, besonders der häufigen Gewitter bestätigt diesen Effekt. Wie eine Analyse der Häufigkeiten zeigt, ist er jedoch abhängig von synoptischen, von Tag zu Tag veränderlichen Prozessen, ebenso auch von der jahreszeitlichen Änderung des großräumigen dreidimensionalen Wind-, Temperatur- und Feuchtefeldes.

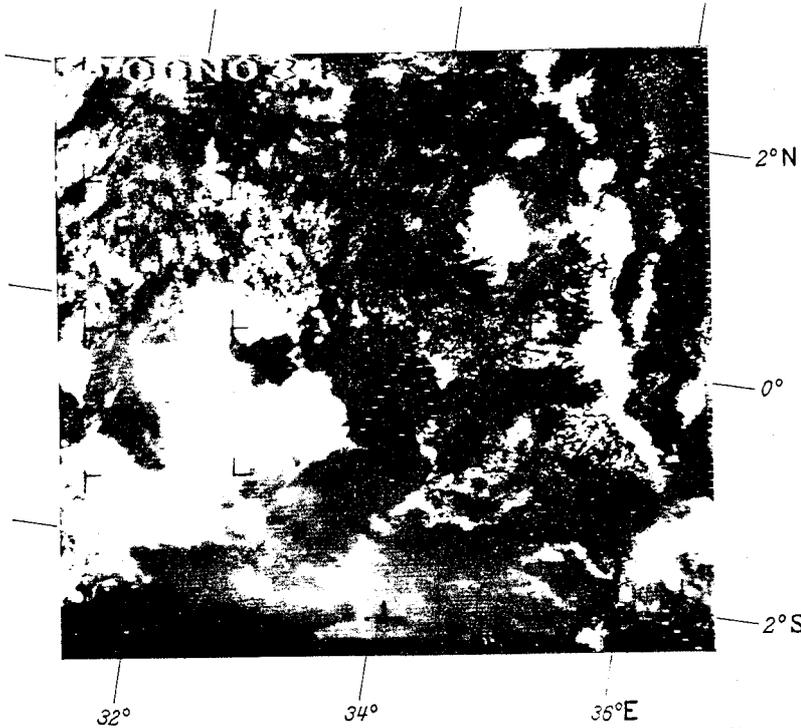


Abb. 7. AVCS-Aufnahme des Satelliten Nimbus I. 3. 9. 1964, 0921 Z (Orbit SS; 9, Flughöhe 880 km). Leider sind durch Vergrößerung und Raster manche Details des Originals verlorengegangen

dagegen wieder weitgehend wolkenfrei. Über dem Bergland um Kisii (im Winkel zwischen Kavirondo-Golf und Ostufer des Victoria-Sees) sind kleinräumige Konvektionswolken entwickelt.

Gleichzeitig mit Abb. 7 erfaßte die nach W zeigende Seitenkamera eine analoge Wolkenverteilung am Kiwu-See und am Albert-Edward-See. Ganze 3 min vorher lieferte die Hauptkamera ein noch eindrucksvoller detailliertes Bild vom wolkenfreien Njassa-See mit einem hervorragend organisierten Netz normaler Konvektionswolken über Süd-Tansania und Malawi, das einer eingehenderen Bearbeitung unterzogen werden soll. Ähnliche Aufnahmen liegen noch vom Njassa-See (16. 9.), vom Tanganyika-See (18. 9.) und vom Albert-See (15. 9.) vor. Zwei weitere Aufnahmen vom Victoria-See vom 16. 9. (Nordteil wolkenfrei) und 19. 9. (Kavirondo-Golf wolkenfrei, Zentrum und Süden unter einer ausgedehnten Wolkendecke einer synoptischen Störung) sind weniger leicht zu interpretieren.

### VII. Zusammenfassung und weitere Hinweise

Eine beschreibende Darstellung der tagesperiodischen Variation und der räumlichen Verteilung der wichtigsten meteorologischen Elemente (Wind, Niederschlag, Bewölkung) am Victoria-See führt zu dem Resultat, daß das auffällige, hier durch Inselstationen sicher nachgewiesene Niederschlagsmaximum mitten auf dem See (fast 230 cm/Jahr gegenüber 100—150 cm an den Küsten) mit der Konvergenz der regelmäßigen nächtlichen Landwinde über dem See zusammenhängt. Mit der großräumigen Ostkomponente der allgemeinen Strömung verschiebt sich das Konvergenzgebiet in die West-

Es liegt nahe, diese Ergebnisse zu vertiefen durch weitere Untersuchungen, Rechnungen und Schätzungen. So könnte man hier aus dem Größenverhältnis zwischen Regengebiet und Einzugsgebiet der Nachtzirkulation eine zahlenmäßige Abschätzung des „Entrainments“ in der Atmosphäre gewinnen; das Decca-Radargerät in Entebbe könnte hierzu brauchbare Unterlagen liefern. Möglicherweise dehnt sich das Regenmaximum auf dem See (Abb. 4) noch weiter nach S und E aus, was mit Radarbeobachtungen nachgewiesen werden könnte. Auch für die „differentielle Heizung“ von Land und See, die verschiedenen Terme der Wärme- und Strahlungsbilanz, bieten sich zahlenmäßige Überlegungen an. An der immerfeuchten Nordküste des Sees, wo das Land weithin von Papyrusümpfen, dichten gartenartigen Anpflanzungen von Mais, Baumwolle und anderen Kulturen sowie von Regenwaldresten eingenommen wird, sind die horizontalen Unterschiede der Albedo, der effektiven Ausstrahlung wie der aktuellen Verdunstung zwischen Land und See gering, viel geringer als unter den Bedingungen des Savannen- oder Steppenklimas auf der Südseite. Aber auch Untersuchungen dieser Art sollten nach Möglichkeit nicht nur auf empirischen Formeln und noch so gut begründeten Abschätzungen, sondern auf tatsächlichen Messungen aufgebaut sein, wie sie z. B. PEREIRA u. Mitarb. im Bergland von Kericho sowie in Nordwest-Uganda angestellt haben [19]. Eine sorgfältige Analyse des Wasserdampftransportes über Entebbe und Nairobi ist z. Z. in Bearbeitung; sie sollte durch eine Bearbeitung des Windfeldes der unteren Schichten auf Grund der Pilotballondaten der synoptischen Stationen ergänzt werden.

In Indonesien ist ein nächtliches Maximum der Konvektion und Gewitterbildung auf See — als Folge der Konvergenz der Landwindssysteme der großen Inseln — wohl bekannt [13], während in den Nachmittagsstunden die riesigen, Durchmesser von mehreren 100 km erreichenden Cumulonimbusmassive mit ihren 8—10 km mächtigen Eisschirmen vom Flugzeug aus überaus eindrucksvoll sind. Die Rolle der nächtlichen Konvergenz über dem Roten Meer wurde kürzlich [14] nachgewiesen. Sicher sind in tropischen und subtropischen Meeresbuchten und Seen noch verschiedentlich ähnliche Systeme „synoptischer“ Größenordnung (100—300 km) nachzuweisen. So sollte man während der Regenzeit am Tschadsee, am abgelegenen Rudolf-See, am Tana-See oder am Golf von Oman nach diesem Phänomen fahnden. Ähnliches gilt für den karibischen Raum (etwa zwischen Jamaica und Cuba, am Maracaibo-See), am Golf von Nieder-Kalifornien, am Titicaca-See oder am Carpentaria-Golf. Seine physikalische Ursache liegt in den räumlichen Unterschieden des Transportes fühlbarer Wärme von der Erdoberfläche in die Luft [14]. Es gibt sogar Hinweise dafür, daß in der Trockenzeit solche Differenzen zwischen der dann trockenen Savanne und dem feuchten, stark verdunstenden tropischen Regenwald solche tagesperiodische Zirkulationen hervorrufen, die ebenfalls von erheblichen klimatischen Folgen begleitet sind; vergleichende Untersuchungen der tagesperiodischen Winde lohnen sich in diesen Breiten auch heute noch ganz besonders.

Die Autoren sind den Meteorologen des East African Meteorological Department — besonders D. J. BARGMAN, H. T. MÖRTH, H. W. SANSOM und B. W. THOMPSON — für zahlreiche Hinweise und Diskussionen sowie die zahlreichen amtlichen Veröffentlichungen des Beobachtungsmaterials zu größtem Dank verpflichtet.

#### Literatur

- [1] THORNTONWAITE, C. W.: WMO-Bulletin **2**, 40—46 (1953). — [2] KNOCH, K.: Ber. Dt. Wetterdienst **85** (1963). — [3] GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht, 4. Aufl. (Abschnitt VII) 1961. — [4] BERSON, H. u. O. ELIAS: Abh. Aeronaut. Observ. Lindenberg 1910 (Sonderband). — [5] PALMER, C. E.: Weather **9**, 341 (1952). — [6] BROOKS, C. E. P.: Geophys. Mem. **20** (1923). — [7] STEINHAUSER, F.: Wetter und Leben **1**, 260 (1948). — [8] MÖRTH, H. T.: Quart. J. roy. Meteorol. Soc. (in print); cf. Weather 1965, 226 (1965). — [9] BARGMAN, D. J. (Editor): Tropical Meteorology in Africa, Munitalp Foundation Nairobi 1960. — [10] THOMPSON, B. W.: Mem. East African Meteor. Dept. **8** (1957). — [11] East African Meteor. Dept.: Frequencies of Surface Wind Speeds and Directions 1961. — [12] TROLL, C.: Bonner Geogr. Abh. **9**, 124 (1952). — [13] BRAAK, C.: Verh. Kon. Magn. Meteor. Obs. Batavia 1921—1929. — [14] FLOHN, H.: Bonner Meteor. Abh. **5**, 2 (1965); Erdkunde **19**, 179 (1965). — [15] COCHEMÉ, J. in D. J. BARGMAN [9], S. 185. — [16] SANSOM, H. W.: Nubila **4**, 34 (1961). — [17] FLOHN, H.: WMO Techn. Note **64**, 21 (1964); Bonner Meteor. Abh. **5**, 49 (1965). — [18] Bonner Meteor. Abh. **4**, 80 (1964). — [19] PEREIRA, C. E., and coll.: East Afr. Agricult. Forestry J. **27** (1962).