

DER TAGESGANG DES NIEDERSCHLAGES AUF DEN HAWAII-INSELN

Ein Beitrag zur klimatischen Differenzierung pazifischer Inseln

Mit 14 Abbildungen, 1 Übersichtsskizze und 7 Tabellen

THOMAS A. SCHROEDER, BERNARD J. KILONSKY, WERNER KREISEL

Summary: Diurnal rainfall variability over the Hawaiian Islands

A detailed study has been made of hourly rainfall records in the Hawaiian Islands. Rainfall frequency distributions reflect the complexity of interaction between the trade winds and large islands. The mountainous Hawaiian Islands exert a profound influence over the local weather. Diurnal rainfall variation is specifically influenced by mesoscale circulations. The masses of Mauna Loa and Mauna Kea produce mountain-sea breeze oscillations which overwhelm the prevailing trade winds. On the Hilo (windward) slopes the result is a strengthened nocturnal maximum near Hilo which disappears upslope. On leeward slopes sea breezes produce afternoon rainfall maxima. To a lesser degree Haleakala produces similar effects on Maui. The windward slopes of the smaller islands have diurnal cycles which are reminiscent of open ocean conditions. Leeward sections of smaller islands have less clear cut diurnal cycles although several locations are influenced by local sea breezes. Oahu is unique in that it has two formidable mountain masses which lie normal to the trade wind direction. The Koolau range effectively desiccates air crossing it; convective activity produces afternoon effects over the Waianaes and the central saddle near Wahiawa is in between the two.

First harmonic curves were fit to the hourly distributions with useful results for nearly all stations. The major contributor to lack of fit is less than 12-hour interval from minimum to maximum. An indicator of amplitude of diurnal cycle is the ratio of maximum to minimum frequency. As might be expected the largest ratios occurred in the locations of strongest mesoscale circulations, especially the Kona sea breeze. Extremely wet stations such as near mountains which do not penetrate the trade inversion (Oahu, Kauai, West Maui) have small ratios. With the exception of a few extremely dry locations the partition of data into light rain days (hourly totals 2.5 mm) produced no additional insight. This matches an observed feature of island median rainfall distributions. While storms provide much quantitative rainfall in leeward areas, they do not alter the island distribution, which is dominated by daily events.

Ziel der Untersuchung

Ein allgemein bekanntes Charakteristikum des Klimas auf Hawaii ist eine bemerkenswerte Wiederholung des täglichen Niederschlagsanges während Zeiten beständiger Passatwinde. Für meteorologische und klimatologische Zwecke ist ein gut ausgeprägter Tagesgang des Niederschlages aus zwei Gründen von Bedeutung:

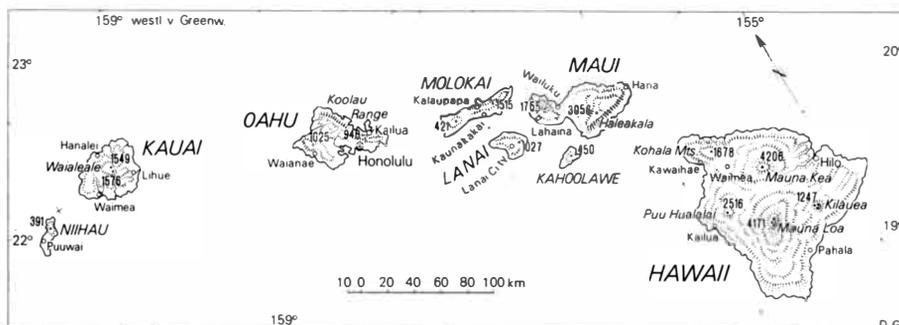
1. bietet er eine ausgezeichnete Grundlage für Wettervorhersagen in stabilen Wetterlagen;
2. impliziert er das Vorhandensein eines sich ständig wiederholenden Prozesses.

Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich hauptsächlich mit dem zweiten Gesichtspunkt. Dabei wird sich herausstellen, daß der Tagesgang des Niederschlages auf Hawaii nicht nur beständig ist, sondern je nach der Lage auf diesen gebirgigen Inseln in Abhängigkeit von den topographischen Gegebenheiten variiert. Die sich dabei ergebenden räumlichen Differenzierungen beruhen auf mesoklimatischen Prozessen.

Forschungsstand

Der Tagesgang des Niederschlages ist der Gegenstand vieler wissenschaftlicher Veröffentlichungen seit dem 19. Jh. Mehrere kürzlich erschienene Arbeiten (WALLACE 1975; JACOBSEN 1976) bieten hierbei eine gute Literaturübersicht und zeigen verschiedene Forschungsansätze. So faßte beispielsweise WALLACE (1975) zusammen, daß die für die tägliche Differenzierung des Niederschlagsanges verantwortlichen Mechanismen in zwei Gruppen eingeteilt werden können:

1. thermodynamische Prozesse, die die hydrostatische Stabilität verändern;
2. dynamische Prozesse, die die Massenkonvergenz in der planetarischen Grenzschicht beeinflussen.

**Übersicht: Hawaii-Inseln**

Outline map: Hawaiian Islands

Eine Reihe von Wissenschaftlern hat Niederschlag oder Bewölkung über tropischen Ozeanen unter Benutzung von Inselstationen oder Schiffsdaten untersucht (RIEHL 1947; GARSTANG 1958; LAVOIE 1963; KRAUS 1963; HOLLE 1968; BRIER und SIMPSON 1968 u. a.). Ihre Ergebnisse sind von JACOBSEN (1976) zusammengefaßt und vergleichend betrachtet worden.

Die Resultate anderer Untersuchungen sind vielfältig. Mehrere Radarstudien (HOLLE 1968; HUDLOW 1970; PESTAINA-HAYNES und AUSTIN 1976) fanden frühe Morgen-Maxima bei konvektiver Aktivität über tropischen Ozeanen. LAVOIE (1963) erforschte den Tagesgang des Niederschlages über dem Eniwetok-Atoll und stellte ebenfalls ein Maximum des Niederschlages um 0400 h fest, ein Ergebnis, das von vergleichbaren Resultaten von 10 anderen Atollen bestätigt wurde. Als Erklärungsmöglichkeiten führte er hierzu aus:

1. die häufig erwähnte Strahlungsdestabilisierung würde sich seiner Ansicht nach während eines Zeitraumes von mehreren Stunden entwickeln und käme am deutlichsten vor Sonnenaufgang zum Tragen;
2. als Ergebnis der Abkühlung der Luft an der Ozeanoberfläche würde virtuelle Wärme vom Ozean in die Atmosphäre abgegeben werden mit einem Maximum gegen 0600 h.

BRIER und SIMPSON (1969) zeigten auf, daß die Druckwelle der halbtägigen Hauptsonnentide (S_2) statistisch mit Niederschlag und Bewölkung in den Tropen verbunden war. Sie untersuchten zwei Stationen – Wake Island und Djakarta (Batavia) – und stellten die Hypothese auf, daß verstärkte Bodenwindkonvergenz vor dem Eintreffen der S_2 -Druckspitze niedrige Bewölkung und Niederschlag fördere. Dieser Mechanismus sollte nach ihrer Ansicht Bewölkung und Niederschlagsmaxima um 0700 h und 1900 h hervorrufen.

JACOBSEN (1976) untersuchte ausführlich den Tagesgang des Niederschlages und seine Differenzierung auf 8 Inseln im Pazifik während des Zeitraumes zwischen 1961 und 1973. Er fand heraus, daß seine „großen“ Inseln ein nachmittägliches Konvektionsmaximum aufwiesen, das sich auf den kleineren Inseln nicht zeigte. Die größte von JACOBSENS „großen“ Inseln, Guam, ist freilich kleiner als fünf der sechs größeren Hawaii-Inseln. Abgesehen vom nachmittäglichen Konvektionsmaximum trat ein weiteres Maximum am frühen Morgen auf. RUPRECHT und GRAY (1974) hatten ähnliche Ergebnisse für „cloud clusters“ in tropischen Ozeanen. GRAY (1976) faßte die Ergebnisse früherer Arbeiten in einer Theorie zusammen, die die Schwankungen im Tagesgang der niedrigen Konvektion über tropischen Ozeanen in Abhängigkeit von der Strahlung sieht.

Die erwähnten Studien in tropischen Bereichen zeigten drei grundlegende Mechanismen, die Maxima der Bewölkungs- und Niederschlagshäufigkeit über tropischen Ozeanen während des Tagesablaufs verursachen:

1. Strahlungsmechanismen
 - a) Abkühlung an der Wolkenobergrenze (LAVOIE 1963)
 - b) seitliche Wärmeabstrahlung (GRAY 1976);
2. Gezeiteneinflüsse (BRIER und SIMPSON 1969);
3. Austauschprozesse an der Meeresoberfläche (LAVOIE 1963).

Aus der Betrachtung mesoklimatischer Einflüsse im Zusammenhang mit dem Vorhandensein großer tropischer Inseln (größer als JACOBSENS) lassen sich zusätzliche Aufschlüsse gewinnen, insbesondere hinsichtlich ihres Zusammenspiels und ihres Einflusses auf die großmaßstäbliche planetarische Zirkulation. RAMAGE (1964) benutzte in Malaysia und Singapur automatische Niederschlagsschreiber, mit deren Hilfe er fünf verschiedene Niederschlagsregime herausstellte. Er zeigte auf, daß jedes dieser Regime mehr oder weniger deutlich auf einer Verknüpfung von mesoklimatischen Zirkulationen, die durch die malaiische Halbinsel und die benachbarte Insel Sumatra hervorgerufen sind, und dem makroklimatisch vorherrschenden Monsun-Regime beruhen. Bei der jahreszeitlichen Umkehr des Monsuns ändert sich der Tagesgang des Niederschlages ebenfalls. Auch diese Änderung erklärte RAMAGE durch die Verbindung mesoklimatischer Faktoren mit dem Monsunwechsel.

Was Hawaii betrifft, so ist hier ein nächtlicher Anstieg der Schauerstätigkeit im Gefolge des Passates seit langem bekannt (LOVERIDGE 1948; JONES 1939). Der Mechanismus der Labilisierung durch Abstrahlung im Infrarotbereich wurde dabei als die wahrscheinliche Ursache angesehen. LEOPOLD (1948) untersuchte den Tagesgang des Niederschlages an acht Niederschlagsstationen in Oahu und Lanai. Er stellte fest, daß der Tagesgang des Niederschlages je nach Lage und Topographie unterschiedlich ist und erhielt zwei Typen des täglichen Niederschlagsganges:

1. nächtliche Maxima in Verbindung mit einem Nachmittagsminimum,
2. Nachmittagsmaxima mit einem nächtlichen Minimum.

Den Unterschied führte er auf das relative Überwiegen des Passates bei den Stationen des ersten Typs und konvektiven Niederschlägen beim zweiten Typ zurück. Austrocknung der Luftmassen durch luvseitige Barrieren trugen seiner Ansicht nach ebenfalls zu den Nachmittagsmaxima der Stationen des zweiten Typs bei.

Datenmaterial und Methode der Untersuchung

Im Gegensatz zu den genannten Forschungsarbeiten ergibt die vorliegende Untersuchung, daß die Hawaii-Inseln im Hinblick auf den Tagesgang des Niederschlages weitaus differenzierter sind sowie daß die verursachenden Mechanismen viel komplizierter sind als bisher angenommen.

Die Hauptquelle für unsere Untersuchung waren die Datenmaterialien, die auf Computerbändern des National Climatic Center, Asheville, North Carolina, gespeichert sind und die die stündlichen Niederschlagswerte für Hawaii enthalten. Im wesentlichen erstrecken sich die Beobachtungsreihen von März 1965 bis Dezember 1973. Vier Stationen (Honolulu, Hilo, Kahului und Lihue) hatten ausführlichere Daten. Für mehrere Stationen waren die Daten weniger vollständig (besonders auf Oahu), hauptsächlich wegen der Aufgabe oder Verlegung mancher Stationen und wegen des Wechsels im Typ der verwendeten Niederschlagsschreiber.

Abgesehen von mechanischen Fehlerquellen sind zwei technische Eigenschaften der Niederschlagsschreiber für den Verlust von Daten verantwortlich:

1. der übliche („universal“) Niederschlagsmesser neigt während Unwettern mit heftigen Niederschlägen zum Überlaufen (Kapazität = 30,5 cm);
2. der Fischer-Porter-Niederschlagsmesser zeichnet jeweils nur 0,10 inch (2,5 mm) auf. Während dies für die Datenreduktion vorteilhaft ist, macht es den Niederschlagsmesser für eine Studie des Tagesgangs des Niederschlags, wo auch die kleinsten Beträge gemessen werden müssen, wertlos. Da die Fischer-Porter-Niederschlagsmesser, die durch die Pacific Region des National Weather Service (NWS) entwickelt wurden, in immer stärkerem Maße zum Einsatz kommen, ist die vorliegende Studie wahrscheinlich die letzte ihrer Art für Hawaii.

Für unsere Zwecke wurden lediglich die vollständigen 24-Stunden-Daten in dem Datensatz belassen. Glücklicherweise blieben dabei mit wenigen Ausnahmen alle Daten für 103 Stationen auf den sechs größeren Inseln erhalten. Sechs neue Datensätze wurden geschaffen, von denen zwei im folgenden genauer betrachtet werden sollen:

1. die Verteilung der täglichen Niederschlagshäufigkeit in bezug auf Monat und Jahr (Gesamtmenge/Stunde $\geq 0,25$ mm);
2. die Verteilung der täglichen Niederschlagshäufigkeit für Tage, an denen der Niederschlag/Stunde stets $\leq 0,25$ mm betrug.

Die folgende Diskussion konzentriert sich auf den ersten Datensatz.

Physikalische Mechanismen als Ursachen des täglichen Niederschlagsanges in Hawaii

Da die Passatwetterlage das vorherrschende Wetterregime ist, werden sich die folgenden Ausführungen mit den lokalen Schwankungen während dieser Wetterlage beschäftigen. Die Situation auf den Hawaii-Inseln wird durch die beträchtliche Größe dieser Inseln kompliziert. Lokal- und mesoklimatische Niederschlagszyklen, die auf der Erwärmung der Erdoberfläche be-

ruhen, stehen in Verbindung mit den größermaßstäblichen Zyklen oder überlagern diese sogar und beeinflussen so den Tagesgang mit.

Es bleibt festzuhalten, daß nächtliche Bewölkungs- und Niederschlagsmaxima für tropische Ozeane typisch sind. Drei Mechanismen scheinen hierfür signifikant zu sein. Die S_2 -Druckwelle ist für frühabendliche und spätmorgendliche Konvergenzmaxima im unteren Passatbereich verantwortlich (BRIER und SIMPSON 1969). Strahlungsdestabilisierung infolge der Abkühlung der oberen Wolkendecke und/oder Transport virtueller Wärme von der Meeresoberfläche (LAVOIE 1963) lösen Konvektionsbewegungen und Entwicklung niedriger Wolkfelder aus. LEOPOLD (1948) beobachtete, daß die Höhe der Passatinversion über See bei Schiff N (13° N, 140° W) am größten am frühen Morgen war (0300 h). Jedoch machte bereits LEOPOLDs Studie die Differenzierung, die durch das Vorhandensein großer Inseln hervorgerufen wird, deutlich. Die Höhenlage der Inversion über Honolulu war am größten gegen Mittag.

Das Vorhandensein hoher Bergmassive wie Mauna Loa, Mauna Kea und Haleakala hat weitere Komplikationen zur Folge. Berg(Land)wind-Tal(See)wind-Zirkulationen überlagern die Passate und bestimmen das lokale Witterungsgeschehen. Niedrigere Berge (West Maui, Kauai, Waianae Mountains) unterstützen – freilich nur im Lee – die lokalen Seewinde, die hier überdies weniger intensiv sind.

Die Differenzierung der einzelnen Hawaii-Inseln ist nun jeweils verschieden. Die Insel H a w a i i nimmt zwei Drittel der Fläche des Staates Hawaii ein und ist durch drei mächtige Vulkane und drei mittelhohe Berge aufgebaut (Abb. 1). Das Lokalwetter wird durch Mauna Loa (4171 m) und Mauna Kea (4206 m) bestimmt. Ein Vergleich des Tagesgangs des Niederschlags von Stationen zwischen Hilo und Kailua-Kona bezeugt die Auswirkung dieser Berge. Die Beständigkeit des nächtlichen Bergwindes in Hilo wird durch den vorherrschenden SW-Wind am Flughafen von Hilo bestätigt (BLUMENSTOCK und PRICE 1967). Die Grenze zwischen dem Berg(Land)wind und den vorherrschenden Passaten bildet eine Konvergenzlinie, die die Wolkenbildung begünstigt. Nach Sonnenaufgang erwärmen sich die oberen Hänge des Mauna Loa schnell. Der Kaltluftsee, der sich über Nacht gebildet hat, erwärmt sich und „zieht sich zurück“, während ein Seewind den Passat verstärkt. Hieraus ergibt sich ein glatter Tagesgang mit einem flachen nächtlichen Maximum und einem deutlich ausgeprägten Nachmittagsminimum. Dieser Zyklus ist im Sommer, der Zeit der größten Passathäufigkeit, am deutlichsten sichtbar (Abb. 2). Die nur schwach ausgeprägte nächtliche Spitze ist die Konsequenz von aufeinanderfolgenden Schauern, die ins Land driften, den Landwind überlagern und sich nach hangaufwärts auflösen. Lava Tree Park (5460) im Distrikt Puna weist im Prinzip ein gleichartiges Niederschlagssystem auf (Abb. 1).

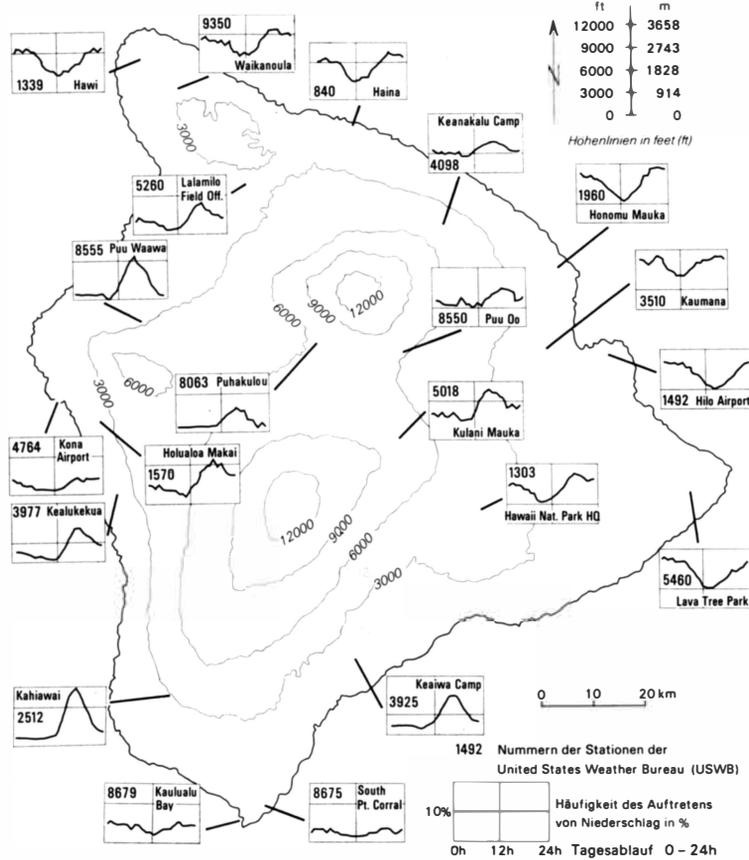


Abb. 1: Prozentuale Häufigkeitsverteilung für den Tagesgang des Niederschlages auf der Insel Hawaii
Frequency of diurnal rainfall distribution on the Island of Hawaii

	Tageszeit local hour ending at																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24 ^h
J	18	16	13	12	15	13	14	13	11	14	10	10	10	10	10	12	12	13	13	17	15	16	18	18
F	18	18	15	19	16	16	16	17	18	16	14	15	11	9	10	11	13	13	15	18	19	17	17	17
M	28	25	24	23	23	22	20	24	17	17	18	16	12	14	12	14	17	18	19	23	25	22	27	29
A	31	31	30	31	32	36	31	31	26	26	22	17	16	17	19	19	18	22	28	28	27	31	27	31
M	25	23	25	27	25	22	18	21	17	17	15	11	7	7	7	10	11	15	15	20	22	26	28	27
J	26	20	23	22	23	25	23	19	20	14	14	11	7	6	4	4	6	9	13	17	19	21	25	24
J	26	30	32	29	26	34	30	26	21	20	16	9	9	10	7	7	7	8	10	19	24	29	29	27
A	21	23	22	26	21	24	23	19	18	18	15	11	7	5	7	8	10	10	14	19	21	27	26	25
S	24	23	24	22	17	21	17	18	17	13	13	11	9	11	5	9	11	12	13	17	20	20	23	25
O	22	17	20	20	17	19	18	16	14	13	11	8	8	9	9	9	10	13	15	18	18	22	21	19
N	28	29	25	22	23	22	23	25	19	20	18	14	15	13	13	15	16	19	24	26	27	28	26	28
D	26	25	24	24	22	24	19	22	22	18	18	16	15	12	12	13	12	17	18	22	24	24	24	23

Abb. 2: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 1492, Hilo Airport, Hawaii. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 4087 Tage zwischen Jan. 1963 und Dez. 1973.

Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWB station number 1492 on the Island of Hawaii in the State of Hawaii. The length of the record covers 4087 days between Jan 1963 and Dec 1973.

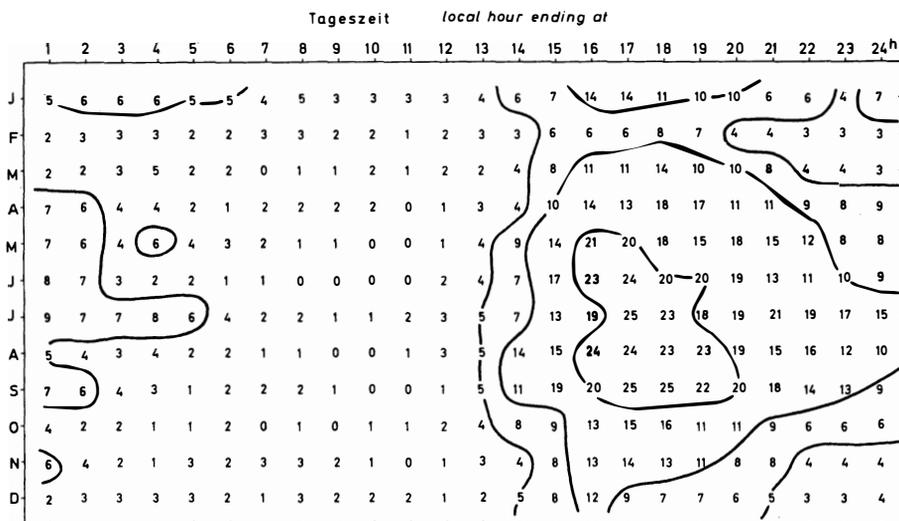


Abb. 3: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 3977, Kealakekua, Hawaii. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 3065 Tage zwischen März 1965 und Dez. 1973.

Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWB station number 3977 on the Island of Hawaii in the State of Hawaii. The length of the record covers 3065 days between Mar 1965 and Dec 1973.

Kaumana (3510) bietet ein ähnliches Bild, ist jedoch während des Tages aufgrund des orographischen Einflusses und der größeren Höhenlage feuchter. Kulani Mauka (5018), am oberen Hang des Mauna Loa in 2530 m Höhe gelegen, erhält den Niederschlag in der Hauptsache am Nachmittag, wenn es in dem feuchten, nach aufwärts gerichteten Luftstrom zur Wolkenbildung kommt. PRICE und PALES (1963) berichten von einem ähnlichen, aber weniger häufigen Phänomen am Mauna Loa Observatory (3387 m).

Pohakuloa (8063) im Humuula Sattel hat ein Nachmittagsmaximum infolge der von E und W kommenden, aufwärts gerichteten Luftströme. Kealakekua (3977) ist für das Kona-Seewind-Niederschlagsregime typisch. Der Passat erreicht den Distrikt Kona nicht mehr; es kommt zu einem mehr oder weniger regelmäßigen Seewind-Zyklus, der während des Sommers am deutlichsten sichtbar ist (Abb. 3). Das Niederschlagsregime von Kealakekua zeigt sich gleichfalls an der SE-Flanke des Mauna Loa am Keaiwa Camp (3925). Am Flughafen Kona äußert sich die Abdrift der Seewindschauer im überlagernden Passat in Niederschlägen vor der Küste.

Stationen im nördlichen Teil der Insel stehen nicht mehr unter dem Einfluß des Mauna Kea, und das Niederschlagsregime ist dort mehr dem ähnlich, das man über offenen Ozeanen erwartet. Die Maxima liegen in der Nacht, und die Häufigkeiten sind geringer.

Wir testeten die Dominanz täglicher Zyklen, indem wir die Verteilungen pro Stunde durch harmonische Kurven approximierten. Schon die „erste harmonische Kurve“ (die einen 24stündigen Zyklus beschreibt) verringert die Varianz der Daten um 64% bis 92% (Tabelle 1). Durch die Asymmetrie der Verteilungen

Tabelle 1: Verringerung der Varianz (%) und Zeitpunkt des maximalen Niederschlages der „ersten harmonischen Kurve“ für typische Stationen auf der Insel Hawaii

Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf Tage mit geringem Niederschlag (Datensatz 2)

(Reduction of variance [percent] and time of maximum of first harmonic for representative Hawaii Island stations)

Station	Verringerung der Varianz (r ²) s. Anm.	Zeitpunkt des maximalen Niederschlages
1303 Hawaii Nat.Park HQ	80.7	2145 h
1339 Hawi	89.4	0051
1492 Hilo Airport	87.5	0212
2512 Kahiawai	75.4	1652
3510 Kaumana	66.5	2318
3925 Keaiwa Camp	72.4	1717
3977 Kealakekua	79.9	1856
4098 Keanakolu Camp	70.6	1810
4764 Kona Airport	88.0	2155
5018 Kulani Mauka	71.0	1748
5260 Lalamilo Field Off.	63.9	1947
5460 Lava Tree Park	91.7	0241
8555 Puu Waawaa	71.7	2158

$$\text{Anm.: } r^2 = \frac{(A - M)^2}{(X - M)^2}$$

mit: M — arithmetisches Mittel der Werte von 24 Stunden

X = tatsächlich gemessener Wert für jede Stunde

A = durch die harmonische Analyse berechneter Wert (für jede Stunde)

wurde in einigen Fällen der „Grad der Anpassung“ gemindert. So hat z. B. Kealakekua ein flaches Minimum und ein nur siebenstündiges Intervall zwischen absolutem Maximum und Minimum. Dies zeigt nochmals, daß sich der Tagesgang des Aufheizzyklus nicht unbedingt in zeitlich genau übereinstimmenden Entsprechungen des Wetters widerspiegeln muß.

Es zeigte sich, daß die Amplitude der täglichen Häufigkeitsverteilung einige interessante Charakteristika der mesoklimatischen Differenzierung der Insel Hawaii offenbart: Das Verhältnis der maximalen zur minimalen Häufigkeit ist bei den klassischen Seewind-Stationen bedeutend größer als bei anderen Stationen (Tabelle 2). Bei luvseitigen Stationen ist dieses Verhältnis niedrig. „Neutrale“ Stationen wurden so genannt, weil sie sowohl in bezug auf die Lage als auch hinsichtlich der Mischung der Zirkulationstypen eine Mittlerstellung einnehmen. Die Stationen an den äußersten Ecken der Insel sind hingegen relativ frei von lokalen Einflüssen (z. B. 1339, 8679).

Die Insel Maui (Abb. 4) wird in ihrem Ostteil durch den Haleakala bestimmt. Dort verursacht dieser Berg starken lokalen Luftmassenaustausch an seinen Hängen. Ulupalakua Ranch (8760) hat ein ausgeprägtes Seewindsystem im Tagesgang des Niederschlags. Paakea (7194) ähnelt Hilo, hat jedoch eine geringere Amplitude, und Waikamoi Dam (9335) weist während des gesamten Tages fast gleichmäßig Niederschläge auf. Da der Haleakala als Bergmasse weniger mächtig ist als der Mauna Loa, kann der von ihm wehende abendliche Bergwind die Schauerquellregion nicht genügend nach außen vor die Küste verlagern. Somit können sich die Niederschläge nicht vor dem Erreichen der 1300-m-Isohypse bei Waikamoi Dam zerstreuen. Selbst im Sommer ist hier in den monatlichen Daten kein besonderer Trend zu erkennen (Abb. 5).

Der Gipfel des Haleakala (1008) hat ein Nachmittagsmaximum wie der Mauna Loa und ist vor allem während des Sommers außerordentlich trocken (Abb. 6). Stationen an den tiefer gelegenen Rändern Mauis haben ausgeprägte nächtliche Maxima (z. B. 3576).

Die Stationen in West Maui sind während des Sommers beständig trocken. Stationen an den niedriger gelegenen Hängen zeigen nächtliche Niederschlagsmaxima (bald nach Mitternacht) wie Field 46 (541). Anscheinend übt der Berg hier nur wenig Einfluß auf die lokale Zirkulation aus. Iao Needle unterscheidet sich hiervon freilich beträchtlich (2208). Dies mag auf die besondere Lage in einem tiefen, in das Gebirge eingeschnittenen Tal zurückzuführen sein mit den daraus sich ergebenden Konsequenzen auf lokale Zirkulationsbewegungen.

Kahului am „Isthmus“ von Maui (2572) ist während des ganzen Jahres, insbesondere jedoch im Sommer, trocken (Abb. 7). Der Tagesgang des Niederschlages muß hier nahezu dem des benachbarten Ozeans entsprechen. Lahaina (5177) gehört zusammen mit Kihei

Tabelle 2: Verhältnis von maximaler zu minimaler Niederschlagshäufigkeit für drei Typen von Stationen auf der Insel Hawaii

(Ratios of maximum to minimum frequencies for three classes of Hawaii island stations)

„Seewind“-Stationen	
Station	Verhältnis
1570 Holualoa Makai	6.75
2512 Kahiawai	7.28
3925 Keaiwa Camp	5.53
3977 Kealakekua	12.90
4764 Kona Airport	4.14
8555 Puu Waawaa	11.90
Mittel	8.08
„Luvseiten“-Stationen	
Station	Verhältnis
840 Haina	2.51
1303 Hawaii Nat.Park HQ	2.31
1492 Hilo Airport	2.49
1960 Honomu Mauka	2.64
3510 Kaumana	1.72
4098 Keanakolu Camp	1.95
5018 Kulani Mauka	2.44
5460 Lava Tree Park	2.54
8550 Puu Oo	1.93
Mittel	2.28
„Neutrale“ oder „gemischte“ Stationen	
Station	Verhältnis
1339 Hawi	2.67
5260 Lalamilo Field Off.	5.29
8063 Pohakuloa	6.12
8675 South Point Corral	3.06
8679 Kaalualu Bay	2.88
9350 Waikanonoula	2.50
Mittel	3.75

(4489) zu den extrem trockenen Bereichen. Niederschläge, die überhaupt meßbar sind, lassen sich hier meist auf Unwetter zurückführen.

Die Resultate der harmonischen Regression waren hier nicht so gut wie für die Insel Hawaii. Die Verringerung der Varianzen (r^2) liegt in diesem Falle zwischen 19% und 84% (Tabelle 3). Die Ergebnisse werden jedoch verständlich im Lichte des jeweiligen Vorhandenseins bzw. Nichtvorhandenseins mesoklimatischer Zirkulationsbewegungen. Meßstationen, die ozeannah waren, zeigten einen durch diese Lage stark beeinflussten Tagesgang. Das Heranziehen der Verteilung der täglichen Niederschlagshäufigkeit an Tagen

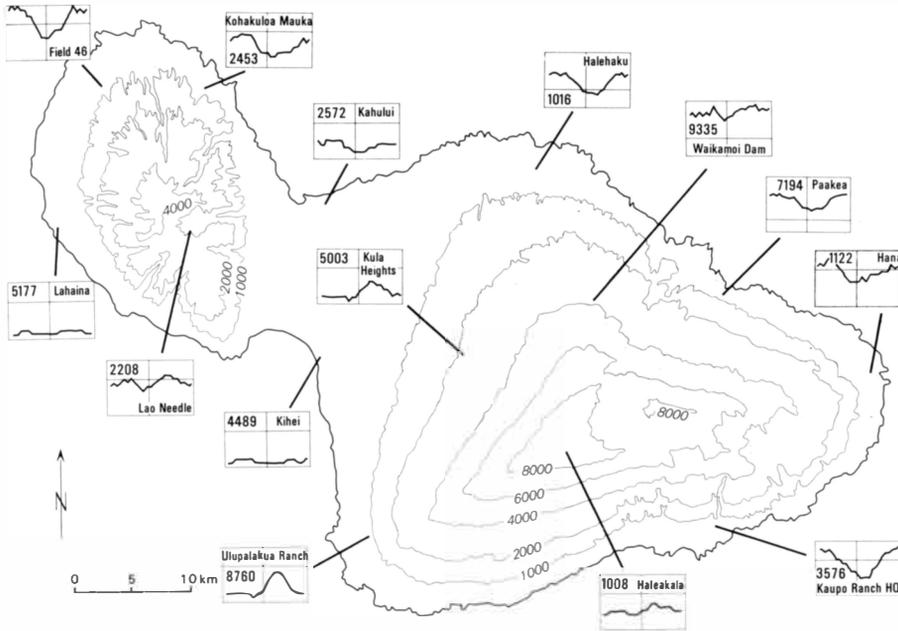


Abb. 4: Prozentuale Häufigkeitsverteilung für den Tagesgang des Niederschlages auf der Insel Maui
 Frequency of diurnal rainfall distribution on the Island of Maui

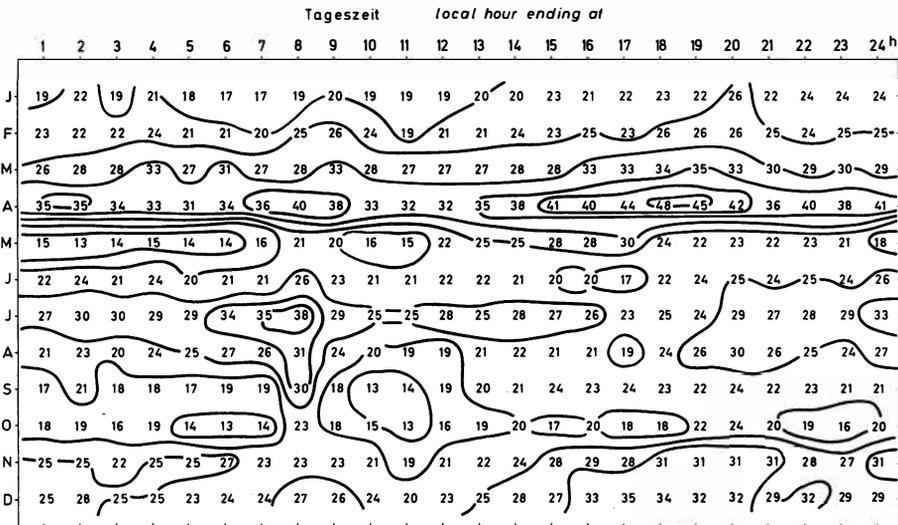


Abb. 5: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 9335, Waikamoi Dam, Maui. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 3180 Tage zwischen März 1965 und Dez. 1973.

Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWB station number 9335 on the Island of Maui in the State of Hawaii. The length of the record covers 3180 days between Mar 1965 and Dec 1973.

mit nur leichten Niederschlägen (Datensatz 2) verbesserte einige Ergebnisse um Werte zwischen 11% (2572 Kahului) und 26% (4489 Kihei). Für trockene Stationen, die nicht mehr unter dem Einfluß des Haleakala stehen, sind Unwetter für die Niederschlagsverteilung besonders wichtig.

Das Verhältnis von Maximum zu Minimum war durchweg klein mit Ausnahme der Ulupalakua Ranch

(8760), die als einzige signifikanten Seewind aufweist (Tabelle 4). Für die übrigen Inseln ist dieses Verhältnis ebenfalls klein.

Die Gebirgszüge O a h u s sind weniger massiv als die auf Hawaii und Maui und üben weniger folgenreichen Einfluß auf das lokale Wettergeschehen aus (Abb. 8). Stationen an der Luvseite und in den Koolau Mountains weisen frühmorgendliche Maxima auf. Sta-

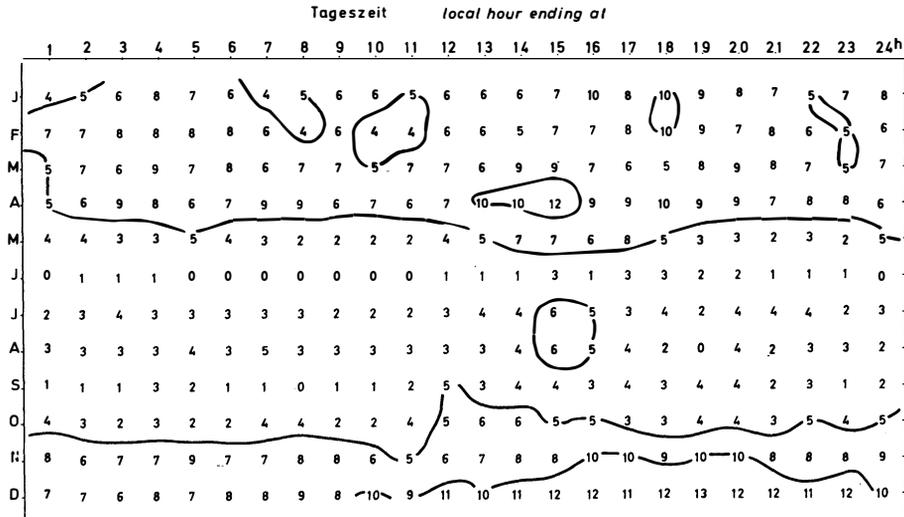


Abb. 6: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 1008, Haleakala, Maui. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 3038 Tage zwischen März 1965 und Dez. 1973.
 Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWB station number 1008 on the Island of Maui in the State of Hawaii. The length of the record covers 3038 days between Mar 1965 and Dec 1973.

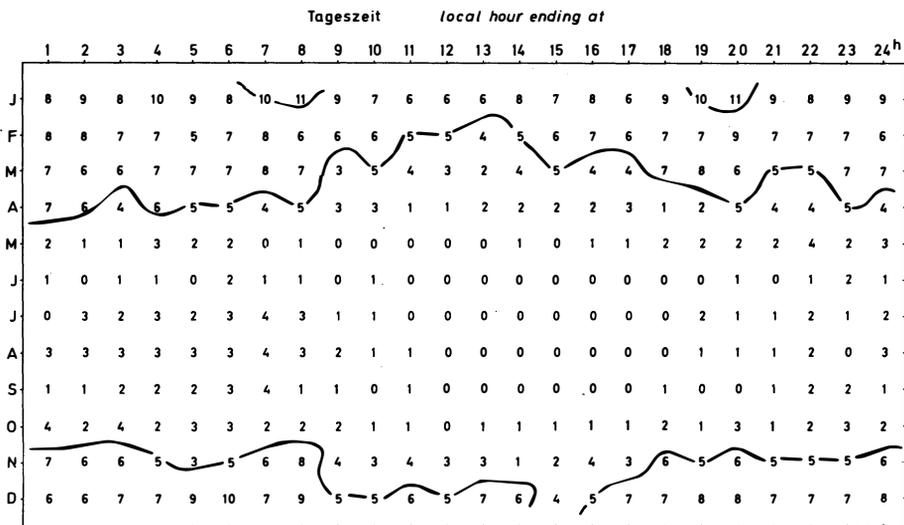


Abb. 7: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 2572, Kahului, Maui. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 4003 Tage zwischen Okt. 1962 und Dez. 1973.
 Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWB station number 2572 on the Island of Maui in the State of Hawaii. The length of the record covers 4003 days between Oct 1962 and Dec 1973.

tionen, die im Lee der Koolau Range liegen, sind trockener als die im Gebirge, und die nächtlichen Maxima verringern sich mit der Entfernung von der Gratlinie (vgl. Honolulu Airport [1919] und Waialua [9195]). Grob gesehen hat Waialua überhaupt keinen Zyklus im Tagesgang aufzuweisen.

Entlang der leeseitigen Waianae-Küste wird ein schwacher Seewind sichtbar, der wie in Lualualei (5647) zu einer Nachmittagsspitze führt. Dauernde Verlage-

rung und Aufgabe von Niederschlagsmessern im Zuge von Entwicklungsmaßnahmen sind für nur kurze Datensätze für viele der 38 Stationen auf Oahu verantwortlich.

Wie oben erwähnt, sind die Amplituden des Tagesganges, was sich auch aus dem Verhältnis von maximaler zu minimaler Häufigkeit ergibt, gleichmäßig klein. Dieses Verhältnis übersteigt gelegentlich 2.00 für Stationen mit ausführlichem Datenmaterial, in der

Tabelle 3: Verringerung der Varianz (%) und Zeitpunkt des maximalen Niederschlages der „ersten harmonischen Kurve“ für typische Stationen auf der Insel Maui

Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf Tage mit geringem Niederschlag (Datensatz 2)

(Reduction of variance [percent] and time of maximum of first harmonic for representative Maui stations)

Station	Verringerung der Varianz (r^2) s. Anm. Tabelle 1	Zeitpunkt des maximalen Niederschlages
1008 Haleakala	61.6	1719 h
2208 Iao Needle	26.3 (48.2)	1920 (2356)
2453 Kahakuloa Mauka	83.8 (85.1)	0257 (0251)
2572 Kahului	72.1 (83.9)	0211 (0231)
4489 Kihei	38.6 (64.8)	0147 (0144)
5003 Kula Heights	69.1	1638
5177 Lahaina	19.2 (36.9)	1844 (2123)
7194 Paakea	82.9	0105
8760 Ulupalakua Ranch	67.5	1612
9335 Waikamoi Dam	45.2	1940

Tabelle 4: Verhältnis von maximaler zu minimaler Niederschlagshäufigkeit für zwei Typen von Stationen auf der Insel Maui

(Ratios of maximum to minimum rainfall frequencies for Maui stations)

Ost-Maui

Station	Verhältnis
1008 Haleakala	1.76
1016 Halehaku	2.66
1122 Hana	1.77
3576 Kaupo Ranch HQ	2.49
5003 Kula Heights	3.32
7194 Paakea	1.71
8760 Ulupalakua Ranch	4.39
9335 Waikamoi Dam	1.40

West-Maui und „Isthmus“ von Maui

Station	Verhältnis
541 Field 46	2.43
2208 Iao Needle	1.47
2453 Kahakuloa Mauka	2.87
2572 Kahului	2.18
4489 Kihei	2.36
5177 Lahaina	2.06

Hauptsache nahe der Koolau Range. Die Ergebnisse der harmonischen Analyse (Tabelle 5) zeigen die beste Approximierung durch die „erste harmonische Kurve“ bei Stationen nahe den Koolau Mountains. Alle Stationen außer Lualualei haben frühe morgendliche Maxima in den Regressionskurven. Die Verringerung der Varianz in Waialua um 3,3% ist außerordentlich gering.

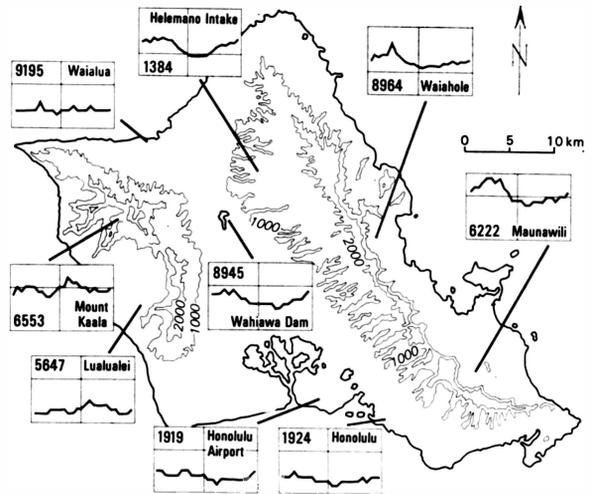


Abb. 8: Prozentuale Häufigkeitsverteilung für den Tagesgang des Niederschlages auf der Insel Oahu

Frequency of diurnal rainfall distribution on the Island of Oahu

Tabelle 5: Verringerung der Varianz (%) und Zeitpunkt des maximalen Niederschlages der „ersten harmonischen Kurve“ für typische Stationen auf der Insel Oahu

Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf Tage mit geringem Niederschlag (Datensatz 2)

(Reduction of variance [percent] and time of maximum of first harmonic for representative Oahu stations)

Station	Verringerung der Varianz (r^2) s. Anm. Tabelle 1	Zeitpunkt des maximalen Niederschlages
300 Camp 84 CPC	34.8	0435
1384 Helemano Intake	86.6	0247
1919 Honolulu Airport	72.2	0429
1924 Honolulu Substation	76.1	0229
5647 Lualualei	59.1	1445
6222 Maunawili	76.2	0446
8945 Wahiawa Dam	79.6	0238
8964 Waiahole	65.8	0411
9195 Waialua	3.3 (31.5)	0156 (0127)

Die Koolau Mountains sind offensichtlich die beherrschende morphologische Erscheinung auf Oahu. Die orographischen Gegebenheiten begünstigen die Niederschlagshäufigkeit, üben aber nur geringen Einfluss auf den ozeanischen Tagesgang aus. Gleichzeitig trocknet die Koolau Range die sie überquerenden Luftmassen wirksam aus. Die leeseitigen Bereiche sind so trocken, daß – an sich nicht häufige – Unwetter den täglichen Niederschlagsgang stark beeinflussen können. Die beachtliche Zunahme der Verringerung der Varianz durch die erste harmonische Kurve für Waialua an Tagen mit geringen Niederschlägen spiegelt die Bedeutung von Unwettern in leeseitigen Bereichen wider. Die Trockenheit von Honolulu während der sommer-

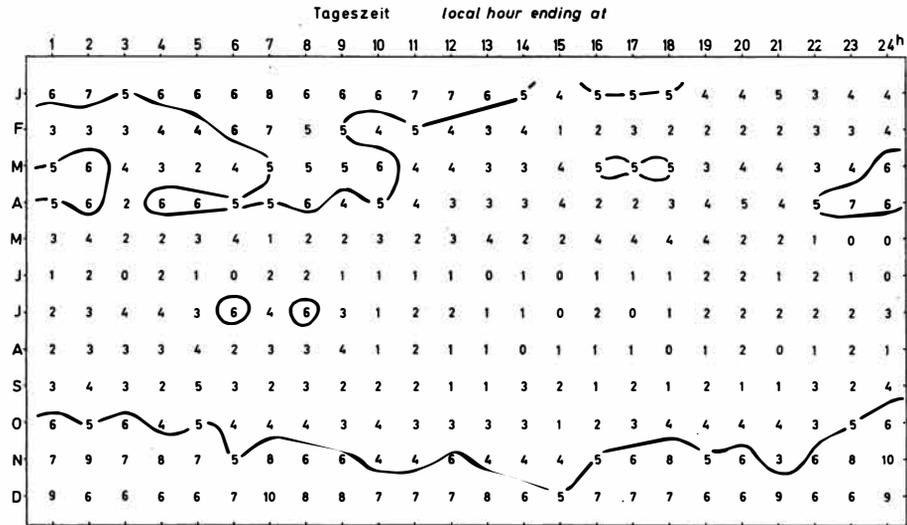


Abb. 9: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 1919, Honolulu Airport, Oahu. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 3929 Tage zwischen Okt. 1962 und Dez. 1973.
 Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWB station number 1919 on the Island of Oahu in the State of Hawaii. The length of the record covers 3929 days between Oct 1962 and Dec 1973.

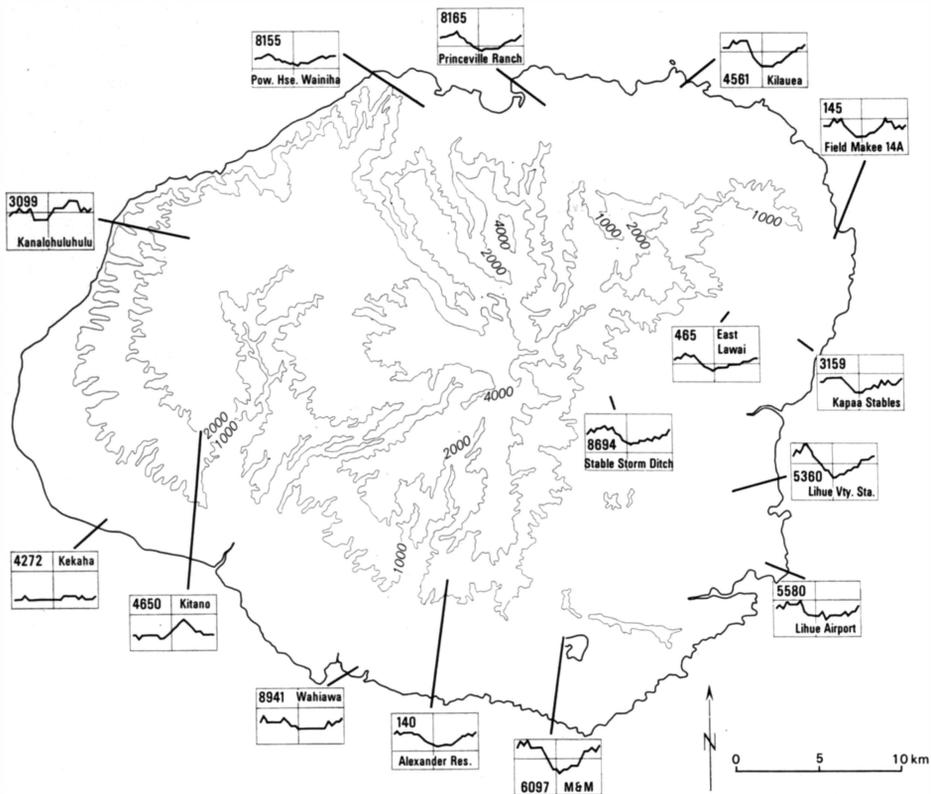


Abb. 10: Prozentuale Häufigkeitsverteilung für den Tagesgang des Niederschlages auf der Insel Kauai
 Frequency of diurnal rainfall distribution on the Island of Kauai

lichen Passatjahreszeit (Abb. 9) zeigt gleichermaßen die Wirksamkeit der Austrocknung durch die Koolau Mountains.

K a u a i (Abb. 10) unterscheidet sich von den größeren Hawaii-Inseln durch das Vorhandensein eines zentralen Berges, dessen Gipfel für überaus ergiebige

Tabelle 6: Verhältnis von maximaler zu minimaler Niederschlagshäufigkeit für Stationen mit nächtlichen Maxima auf der Insel Kauai

(Ratios of maximum to minimum frequencies for Kauai stations with nocturnal maxima)

nahe der Küste	
Station	Verhältnis
0145 Field Makee 14 A	2.03
0465 East Lawai	2.28
3159 Kapaa Stables	1.77
4561 Kilauea	2.04
5560 Lihue Vry.Station	2.33
5580 Lihue Airport	1.92
6097 M & M	2.35
8165 Princeville Ranch	2.36
8941 Wahiawa	2.02

„im Gebirge“	
Station	Verhältnis
0140 Alexander Reservoir	1.73
8155 Pow. House Wainiha	1.42
8694 Stable Storm Ditch	1.73

Jahresniederschläge bekannt ist. Der Tagesgang ändert sich hier systematisch von der Luv- zur Leeseite. Alle Stationen östlich von Kokee (Kanalohuluhulu 3099) haben nächtliche Maxima. Die Schwankungen sind bereits relativ gering (die Verhältnisse von Maximum zu Minimum sind klein) an der Küste, vermindern sich dann zum Gebirge hin, wenn orographische Gegebenheiten zu zusätzlichem Niederschlag führen (Tabelle 6).

Tabelle 7: Verringerung der Varianz (%) und Zeitpunkt des maximalen Niederschlages der „ersten harmonischen Kurve“ für ausgewählte Stationen auf der Insel Kauai

(Reduction of variance [percent] and time of maximum of first harmonic for selected Kauai stations)

Station	Verringerung der Varianz (r ²) s. Anm. Tabelle 1	Zeitpunkt des maximalen Niederschlages
140 Alexander Res.	86.9	0235
4561 Kilauea	82.6	0310
4650 Kitano	62.1	1551
5580 Lihue Airport	73.0	0357
8941 Wahiawa	82.5	0255

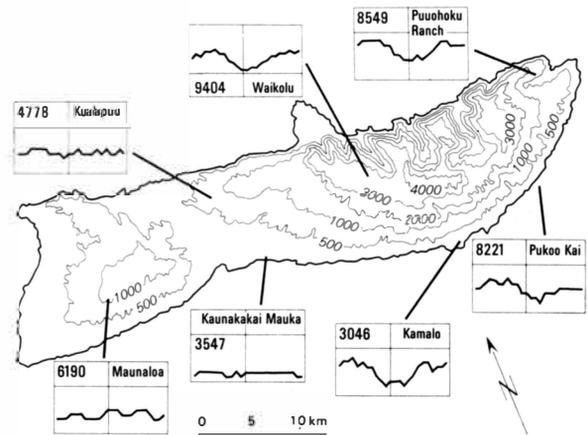


Abb. 11: Prozentuale Häufigkeitsverteilung für den Tagesgang des Niederschlages auf der Insel Molokai
Frequency of diurnal rainfall distribution on the Island of Molokai

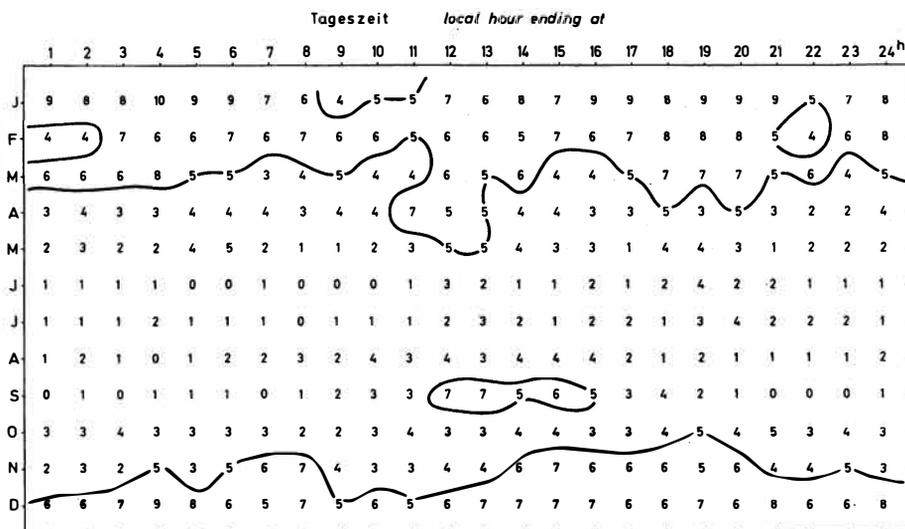


Abb. 12: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 6190, Maunaloa, Molokai. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 3171 Tage zwischen April 1965 und Dez. 1971.

Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWA station number 6190 on the Island of Molokai in the State of Hawaii. The length of the record covers 3171 days between Apr 1965 and Dec 1971.

Auswirkungen des Seewindes werden an den beiden Stationen westlich von Kokee ebenso wie in Kokee sichtbar, wo luvseitige und leeseitige Systeme zusammenwirken. Alle Stationen sind während des Sommers trocken. Die harmonische Regressionsanalyse zeigt, daß die Approximierung durch die erste harmonische Kurve für jede der ausgewählten Stationen gut ist (Tabelle 7).

M o l o k a i (Abb. 11) besteht aus einem feuchten Ost- und einem trockenen Westteil. Die Stationen an der östlichen Luvseite sind durch nicht ganz übereinstimmende nächtliche Maxima bestimmt. Waiholu (9404) in 1100 m liegt nahe der 2000-mm-Jahresisohyete und ist die einzige Station mit beträchtlichem Niederschlag. Mauna Loa (6190) befindet sich im trockenen Westteil. Die Kurve der täglichen Häufigkeitsverteilung ist dort flach; dennoch zeigt sich ein interessantes Phänomen der Zirkulation bei der monatlichen Häufigkeit (Abb. 12): Der „Naulu“ (MALO 1951; LEOPOLD 1949), ein intensiver Seewindschauer, tritt häufig an der Küste von Molokai, insbesondere im Sommer, auf.

L a n a i liegt im Regenschatten von Maui und ist daher trocken (Abb. 13). Alle Stationen haben Nachmittags-Maxima. Kaunalapau Harbor (3461) wird im

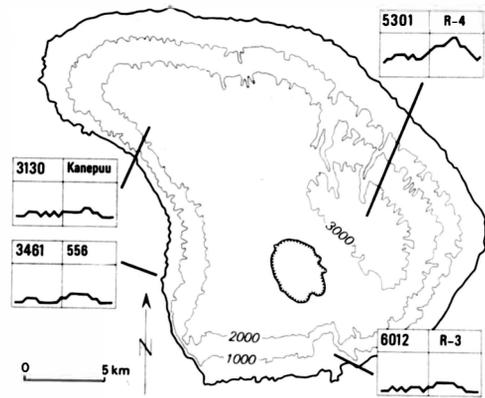


Abb. 13: Prozentuale Häufigkeitsverteilung für den Tagesgang des Niederschlages auf der Insel Lanai
Frequency of diurnal rainfall distribution on the Island of Lanai

Sommer durch einen „Naulu“ beeinflusst (Abb. 14). Seewindschauer zeigen sich darüber hinaus in geringerem Maße bei Stationen in größerer Nähe zum Hauptberg (6012, 3130).

	Tageszeit local hour ending at																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24 ^h
J	6	5	4	6	5	6	6	5	4	4	2	3	4	4	4	3	4	4	4	4	5	5	4	4
F	1	0	0	2	3	2	1	3	2	1	3	2	3	3	3	2	2	3	3	2	3	1	2	2
M	2	3	3	3	3	4	4	2	1	1	1	1	2	5	3	5	3	4	2	2	2	3	3	2
A	0	1	0	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	2	1	1	0	1	1	1
M	0	1	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1	2	2	2	1	2	3	2	1	1	1	2	1
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
J	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	3	3	2	1	0	0	0	0
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	3	2	1	1	0	1	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	2	3	4	4	3	3	4	2	2	0	0	0
O	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	2	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1
N	4	3	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	3	4	5	4	4	3	3	2	2	4
D	2	1	3	4	4	2	2	3	2	2	3	3	4	3	5	5	5	4	3	2	1	3	3	3

Abb. 14: Jährliche Schwankungen in der prozentualen Niederschlagshäufigkeit für USWB Station 3461, 556, Lanai. Der Beobachtungszeitraum umfaßt 3166 Tage zwischen April 1965 und Dez. 1973.

Annual variation of the percent frequency of rainfall for USWB station number 3461 on the Island of Lanai in the State of Hawaii. The length of the record covers 3166 days between Apr 1965 and Dec 1973.

Literatur

BLUMENSTOCK, D. L. und S. PRICE: Climates of the States – Hawaii; U.S. Dept. of Commerce, ESSA, Climatology of the United States, No. 60–61, 1967, 27 S.
BRIER, G. W. und J. S. SIMPSON: Tropical cloudiness and precipitation related to pressure and tidal variations; in: Quart. Journ. Roy. Meteor. Soc., Bd. 95, 1969, S. 120–147.

GARSTANG, M.: Some meteorological aspects of the low-latitude tropical western Atlantic, results of Crawford Cruise, No. 15. Woods Hole Oceanographic Institution, Report No. 58–42, 1958, 97 S., unveröff. Manuskript.
GRAY, W. M.: Diurnal variation of oceanic deep cumulus convection. – Paper II. Physical hypothesis. Atmospheric Science Research Paper, No. 243, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1976, S. 49–106.

- HOLLE, R. L.: Some aspects of tropical oceanic cloud populations; in: *Journal Appl. Meteor.*, Bd. 7, 1968, S. 173–183.
- HUDLOW, M. A.: Radar echo climatology east of Barbados derived from data collected during BOMEX. Preprints 14th Radar Meteorology Conf., Tucson, Amer. Meteor. Soc., 1970, S. 433–437.
- JACOBSEN, R. W. Jr.: Diurnal variation of oceanic deep cumulus convection – Paper I. Observational evidence. Atmospheric Science Research Paper, No. 243, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1976, S. 1–48.
- JONES, S. B.: The weather element in Hawaiian climate; in: *Annals Amer. Geogr.*, Bd. 29, 1939, S. 29–57.
- KRAUS, E. B.: The diurnal precipitation change over the sea; *Journ. Atmospheric Science*, Bd. 20, 1963, S. 546–551.
- LAVOIE, R. L.: Some aspects of the meteorology of the tropical Pacific viewed from an atoll. Hawaii Institute of Geophysics Report, No. 27, 1963, 76 S.
- LEOPOLD, L. B.: Diurnal weather patterns on Oahu and Lanai, Hawaii; in: *Pacific Science*, Bd. 2, 1948, S. 81–95.
– : The interaction of trade wind and sea breeze, Hawaii; in: *Journ. Meteor.*, Bd. 6, 1949, S. 312–320.
- LOVERIDGE, E. J.: Diurnal variations of precipitation at Honolulu; in: *Monthly Weather Rev.*, Bd. 52, 1924, S. 584–585.
- MALO, D.: Hawaiian Antiquities, Honolulu, Bishop Museum, 1951, S. 12–15.
- PESTAINA-HAYNES, M. und G. L. AUSTIN: Comparison between maritime tropical (GATE and Barbados) and continental midlatitude (Montreal) precipitation lines; in: *Journ. Appl. Meteor.*, Bd. 15, 1976, S. 1077–1082.
- PRICE, S. und J. C. PALES: Mauna Loa Observatory: The first five years; in: *Monthly Weather Rev.*, Bd. 91, 1963, S. 665–680.
- RAMAGE, C. S.: Diurnal variation of summer rainfall over Malaysia; in: *Journ. Trop. Geography*, Bd. 19, 1964, S. 62–68.
- RIEHL, H. L.: Diurnal variation of cloudiness over the subtropical Atlantic Ocean; in: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Bd. 28, 1947, S. 37–40.
- RUPRECHT, E. und W. M. GRAY: Analysis of satellite-observed cloud clusters; *Atmos. Science Res. Paper*, No. 219, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1974, 91 S.
- WALLACE, J. M.: Diurnal variation of precipitation and thunderstorms frequency over the centerminous United States; *Mon. Wea. Rev.*, Bd. 103, 1975, S. 406–419.

ÖKOLOGISCHE KLIMATYPEN AM OSTABFALL DER MEXIKANISCHEN MESETA

– Erläuterungen zu einer Klimakarte 1:500 000 (Beilage III) –

Mit 3 Abbildungen und 1 Beilage (III)

WILHELM LAUER

Summary: Ecological-climatic types on the eastern slopes of the Mexican Meseta

The climatic map at the scale of 1:500 000 illustrates climatic types obtained from the altitudinal belts of temperature and the number of humid or arid months respectively. The methodical concept of this map is explained. The relationship between the climatic types and the vegetational division, as well as the ecological importance of the number of humid months or precipitation totals for individual types of vegetation respectively, are discussed. The special climatic phenomena are shown in an additional map at a scale of 1:1 500 000.

In dieser Zeitschrift wurde 1973 (ERDKUNDE 27/1973, Heft 3) über Ergebnisse zur physischen Geographie des Puebla-Tlaxcala-Gebietes berichtet, die im Rahmen des Mexiko-Schwerpunktes der Deutschen Forschungsgemeinschaft erarbeitet wurden. Einzelnen Beiträgen waren damals thematische Farbkarten beigegeben: 1. W. LAUER und H.-J. KLINK: Vegetationsgebiete am Ostabfall der zentralmexikanischen Meseta, 1:1 Mio. 2. H.-J. KLINK, W. LAUER und H. ERN: Ökologische

Vegetationstypen im Puebla-Tlaxcala-Gebiet 1:200 000. 3. W. LAUER und E. STIEHL: Hygrothermische Klimatypen im Raume Puebla-Tlaxcala 1:500 000.

Die hier zu erläuternde Karte mit dem Titel: Hygrothermische Klimatypen am Ostabfall der zentralmexikanischen Meseta 1:500 000 stellt einen weiteren Beitrag zur kartographischen Dokumentation von Ergebnissen des Mexiko-Projektes dar. Das Konzept schließt an Überlegungen an, die bereits der 1973 veröffentlichten Klimakarte für das engere Arbeitsgebiet – die Hochfläche von Puebla-Tlaxcala – zugrunde lagen. Da die Karte den Ostabfall der mittelmexikanischen Meseta bis zur karibischen See einschließt, mußten neue Kriterien für den Entwurf maßgebend werden.

An der Verifizierung des neuen Konzepts wirkte Herr. Dr. P. FRANKENBERG mit. An der technischen Bewältigung des Entwurfs und der kartographischen Gestaltung haben Herr Dr. H. J. RUCKERT und die Kartographen Herr E. BRÜSSHAVER und Frau CH. SCHNEIDEWIND großen Anteil. Mit ihrer Hilfe ist es gelungen, Inhalt, Form und Farbe der Karte möglichst