



## **Berichte des Deutschen Wetterdienstes**

# **7**

### **Statistische Untersuchungen über die Zirkulation der Westdrift in 55 Grad Breite**

von  
Oskar Essenwanger



Zitationsvorschlag:

Essenwanger, Oskar: Statistische Untersuchungen über die Zirkulation der Westdrift in 55 Grad Breite. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1953.  
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 7)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

---

## Nutzungsbedingungen



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz

Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

---

Herausgeber und Verlag: :

Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)  
Mail: [bibliothek@dwd.de](mailto:bibliothek@dwd.de)

## INHALT

	Seite
Maßstäbe und Buchstabenerklärung .....	3
Zusammenfassung .....	3
I. Einführung .....	3
a) Historischer Überblick und Problemstellung ..	3
b) Das Material .....	4
II. Klimatologie der Tröge und Rücken .....	4
a) Häufigkeitsverteilung längs 55°, Andauer und Neubildung .....	4
b) Häufigkeit der Blockierung .....	6
c) Die Verlagerungsgeschwindigkeit .....	7
d) Mittelwerte für L, A, S und U .....	8
e) Häufigkeitsverteilungen .....	10
f) Andauer, Auflösung und Neubildung der Wellen	11
III. Korrelationen (Rossby-Formel) .....	12
a) Einfachkorrelationen .....	12
b) Mehrfachkorrelationen (c und L als Funktion von A und S) .....	17
c) Trog- und Rückenform für extreme Verlagerungsgeschwindigkeit .....	17
d) Korrelation L, A und S als Funktion (U-c) ....	17
e) Abweichungen der Verlagerungsgeschwindigkeit von theoretischen Formeln .....	17
IV. Untersuchung über den Blockierungs-Effekt .....	18
a) Häufigkeit des Westwindmaximums für ausgewählte Längenschnitte .....	18
b) Zeitlicher Ablauf des Blockierungs-Effekts für verschiedene Parameter .....	19
c) Vergleich des Verlaufs der Zonalgeschwindigkeit in verschiedenen Breiten .....	21
V. Schlußbemerkungen .....	21
a) Zusammenstellung der Hauptergebnisse .....	21
b) Folgerungen .....	21
Literatur .....	22

## Maßstäbe und Buchstabenerklärungen

A = Amplitude der Wellen in gpdm, wobei  $A = A_W + A_E$

$A_E$  = Isohypsenabstand Trog zu Rücken im Osten bzw. Rücken zu Trog im Osten

$A_W$  = Isohypsenabstand Trog zu Rücken im Westen bzw. Rücken zu Trog im Westen

c = Verlagerungsgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) in Grad/Tag  
 $10^\circ/\text{Tag} = 2,66 \text{ km/h} = 0,739 \text{ m/sec}$  (für  $\varphi = 55^\circ$ )

L = Wellenlänge in Grad;  $L = L_W + L_E$   
 $1^\circ = 63,84 \text{ km}$  (für  $\varphi = 55^\circ$ )

$L_E$  = Wellenlänge (in Grad) Trog zu Rücken im Osten bzw. Rücken zu Trog im Osten

$L_W$  = Wellenlänge (in Grad) Trog zu Rücken im Westen bzw. Rücken zu Trog im Westen

S = Schiefe in Prozent  $S = \frac{L_W}{L} \cdot 100$

U = Zonalgeschwindigkeit, hier angegeben als Gefälle der 500-mb-Fläche für  $10^\circ$  Breitendifferenz,  $\Delta z$  in gpdm

$$U = -\frac{g}{l} \frac{1}{a} \frac{\Delta z}{\Delta \varphi}$$

g = Erdbeschleunigung

l =  $2 \omega \sin \varphi$

a = Erdradius

$\varphi$  = geogr. Breite

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit der Erde

$$U = 0,997 \Delta z \frac{\text{Grad}}{\text{Tag}} \text{ (für } 55^\circ \text{ Breite und } \Delta \varphi = 60-50^\circ)$$

$U_A$  = Zonalgeschwindigkeit für Amerika ( $120^\circ-40^\circ W$ )

$U_E$  = Zonalgeschwindigkeit für Europa ( $40^\circ W-60^\circ E$ )

$U_H$  oder  $U_{180}$  = Zonalgeschwindigkeit für Europa + Amerika ( $120^\circ W-60^\circ E$ )

$$U_H = \frac{5U_E + 4U_A}{9}$$

$U_{360}$  = Zonalgeschwindigkeit für den gesamten Breitenkreis

$U_H' = 2U_{360} - U_H$

$\beta$  = Coriolisparameter =  $\frac{2\omega \cos \varphi}{a}$

(a = Erdradius)

$\varphi$  = geogr. Breite

$\omega$  = Winkelgeschw. d. Erde

Für  $55^\circ$  Breite lautet die Rossby-Formel

$$c = 0,997 \Delta z - 0,183 \cdot 10^{-2} \cdot L^2 \left[ \frac{\text{Grad}}{\text{Tag}} \right]$$

( $\Delta z$  in gpdm, L in Grad)

## Zusammenfassung

Aus einer Aufstellung über Tröge und Rücken im 500-mb-Niveau längs  $55^\circ N$  für einen dreijährigen Zeitraum wird zunächst über Häufigkeitsverteilung längs des Breitenkreises, Andauer und Neubildung berichtet. Die Häufigkeitsgipfel stimmen mit der Lage der quasi-stationären Tröge und Rücken überein. Während die quasistationären Tröge durch häufiges Durchziehen von Trögen über diesen Gebieten zustandekommen, entstehen die Rücken offenbar durch häufiges Auftreten stationärer Gebilde.

Zonalgeschwindigkeit, Wellenlänge und Amplitude haben einen jahreszeitlichen Gang mit Wintermaximum; räumliche Unterschiede weist neben Wellenlänge und Amplitude besonders die Schiefe auf.

Auf Grund einer statistischen Untersuchung mittels Lochkarten werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Größen und auch der Zonalgeschwindigkeit festgelegt, welche für den gleichen Zeitraum für  $55^\circ N$  bestimmt wurde. Die Rossby-Formel muß erweitert werden, da auch Amplitude und Asymmetrie auf die Verlagerungsgeschwindigkeit einen Einfluß haben. Tröge und Rücken mit westlicher Asymmetrie wandern schnell, mit östlicher langsam, kleine Amplitude bewirkt Beschleunigung, hohe Verzögerung. Es existiert eine Wellenlänge, bei der bevorzugt Blockierung auftritt.

Bei der Blockierung (hier nur nach der Verlagerungsgeschwindigkeit definiert) ist offenbar das Zusammenwirken mehrerer Faktoren notwendig. Neben dem Einfluß der Orographie ist eine Vergrößerung der Wellenlänge durch Neubildung im Westen und eine Abnahme der Zonalgeschwindigkeit zu beobachten. Ferner spielen Warmluftvorstöße bzw. Kaltluftausbrüche sowie eine Verlagerung des Hauptwindmaximums in mittleren Breiten eine Rolle.

## Summary

Drawn from a statistical study on troughs and ridges of the 500 mb level along  $55^\circ N$  for a three-years-period (1950—1952), the first part deals with frequency distribution along the latitude circle, duration and formation. The maxima of frequency coincide with the location of the quasi-stationary troughs and ridges. The quasi-stationary troughs arise by frequent passing of troughs over these regions whilst the quasi-stationary ridges apparently are formed by cumulative appearance of stationary highs.

The zonal velocity of westerlies, the length and amplitude of long waves have a seasonal variation with maxima in winter. Wave length and amplitude and especially the asymmetrical tilt of waves show longitudinal differences. The relation between the different parameters in the above-mentioned period is calculated by statistical methods. Rossby's formula must be enlarged, because amplitude and asymmetry of waves have an influence on the speed of propagation. Troughs and ridges of western asymmetry are travelling fast, of eastern asymmetry slow, low amplitude causes acceleration, high amplitude deceleration. Blocking action is favoured at a certain wavelength.

Blocking action (only defined by the velocity of displacement) is evidently caused by the cooperation of several factors. Besides the influence of orography we observe increasing wavelength by new formation in the west and a diminution of the zonal current. Furthermore warm air currents and polar outbreaks as well as displacements of the zone of maximum westerlies in middle latitudes render an important contribution.

## I. Einführung

### a) Historischer Überblick und Problemstellung

Nachdem Rossby 1939 (23) in einer grundlegenden Arbeit die Beziehung zwischen der zonalen Windgeschwindigkeit U (hier Zonalgeschwindigkeit ge-

nannt), dem Coriolisparameter  $\beta$ , der Wellenlänge  $L$  und der Verlagerungsgeschwindigkeit  $c$  der Tröge aufzeigte ( $c = U - \frac{\beta L^2}{4\pi^2}$ ), haben sich in der Zwischenzeit in mehreren theoretischen Arbeiten Autoren von verschiedenen Gesichtspunkten aus damit beschäftigt, z. B. Namias-Clapp 1944 (18), Charney 1947 (4), Berson 1948 (1), Sutcliffe 1951 (26), Queney 1952 (21), Lönnqvist (16) u. a.

In der Praxis wurde diese sog. „Rossby-Formel“ hauptsächlich von den Amerikanern für die Mittelfristvorhersagen benutzt und auf Mittelkarten von 5—7 Tagen angewandt. Die damit gemachten Erfahrungen wurden in verschiedenen Arbeiten niedergelegt, z. B. Wexler 1942 (30), Walsh 1943/44 (27-29), Namias 1947 (17), Cressman 1948 (5), Hovmöller 1949 (14) u. a.

Wenn trotz dieser Vielzahl hier nochmals das Thema der Trog- und Rückenverlagerung aufgegriffen wurde, so waren hierfür besonders zwei Gründe bestimmt.

Es hat sich gezeigt, daß für Europa die Prognoseergebnisse nicht immer zufriedenstellend waren. Zwar wurden empirisch ermittelte Verbesserungsfaktoren gefunden, aber dabei erhebt sich die grundsätzliche Frage nach neuen Parametern in der Rossby-Formel, welche diese Korrektur (außer der Baroklinität der Atmosphäre) bedingen. Hierbei steht im Vordergrund die Prüfung der Frage, ob die durch die laufende Analyse gegebenen Parameter unmittelbar zur Mittelfristprognose geeignet sind. Zum Unterschied zu den amerikanischen Arbeiten werden aber hier keine Mittelkarten, sondern die Einzelkarten herangezogen. Auch soll untersucht werden, inwieweit sich Aussagen für das Stationärwerden der langen Wellen (sog. Blocking-Effekt) machen lassen.

Weiterhin sollen im Rahmen der Kissinger Untersuchungen zur allgemeinen Zirkulation rein empirisch neue Anhaltspunkte über Häufigkeitsverteilung, Andauer und Bildung von Trögen und Rücken sowie das Zustandekommen quasistationärer Druckgebilde über Amerika, Europa und Asien gewonnen werden.

#### b) Das Material

Als Ausgangsmaterial diente der Kissinger Tägliche Wetterbericht (15). Für den dreijährigen Zeitraum Dezember 1948 bis November 1951 wurde eine Aufstellung über Höhenträge und -rücken für die 500-mb-Fläche längs 55°N gemacht. Dieser Breitenkreis mußte gewählt werden, da er der südlichste ist, für den nach diesem Material eine vollständige Bearbeitung längs eines Breitenkreises möglich war. Um Zufälligkeit in der Isohypsenführung auszuschalten, wurden Tröge und Rücken nicht berücksichtigt, die vom nächstliegenden weniger als 10 Längengrade entfernt waren und dabei nur Unterschiede von 4 gpm aufwiesen. Wie sich bei näherer Prüfung ergab, handelte es sich durchwegs um nichtpersistente Wellen.

Als Wellenlänge  $L$  wird im Gegensatz zu mehreren amerikanischen Arbeiten für den Trog der Abstand der benachbarten Rücken definiert, analog für den Rücken der Abstand der benachbarten Tröge. Damit läßt sich  $L$  unterteilen in  $L_W$  = Abstand Trog zu Rücken im Westen und  $L_E$  = Abstand zu Rücken im Osten. Dadurch kann — Überlegung von Starr (25) folgend — eine Asymmetrie der Tröge und Rücken näher untersucht werden, die durch die Schiefe  $S$

$$S = \frac{L_W}{L} \cdot 100$$

in % definiert ist. Starr versteht zwar in seiner Arbeit unter Asymmetrie die Neigung eines Troges in Richtung N nach S, während hier die asymmetri-

sche Lage eines Troges zwischen zwei Rücken gemeint ist. Ein Zusammenhang besteht jedoch darin, daß ein Druckgebilde, das eine Schiefe größer als 50% hat, auch eine andere N-S-Neigung haben wird als eines mit einer Schiefe kleiner als 50%. Im folgenden wird eine Schiefe unter 45% westlich, eine über 55% östlich benannt, während der Trog oder Rücken mit  $S$  zwischen 45 und 55% als symmetrisch angenommen wird.

Einen weiteren neuen Parameter stellt die Amplitude  $A$  der Wellen dar. Wie bei  $L$  verstehen wir unter  $A_W$  den Unterschied  $\Delta z$  (in gpm) zwischen Trog und Rücken im Westen, analog  $A_E$ . Der Einfachheit halber wurde  $A$  aus der Summe  $A_W + A_E$  gebildet. Im allgemeinen bezeichnet man den halben Wert als Amplitude einer Welle, was bei der vorliegenden Untersuchung jedoch keine Rolle spielt. Auf einen möglichen Einfluß der Amplitude in der Rossby-Formel haben bereits Flohn (10) sowie Namias (18) hingewiesen. Die Zonalgeschwindigkeit  $U$  wurde aus dem Gefälle der 500-mb-Fläche zwischen 50°N und 60°N berechnet.

Die Verlagerungsgeschwindigkeit  $c$  der Tröge und Rücken wurde aus der Wetterkarte ermittelt. Wie ein Vergleich mit der in einer Arbeit von Petterssen (20) veröffentlichten Aufstellung zeigt, stimmt die dort für einen halben Monat durchgeführte Darstellung mit dem hier unabhängig gewonnenen Material völlig überein.

Das Gesamtmaterial umfaßt je rund 6000 Tröge und Rücken. Mittelwerte und Korrelationen wurden mit Hilfe von Lochkarten bearbeitet. Da trotz Ausschaltung der kleinen Wellen noch 4% des Materials aus nur einmal auftretenden Trögen oder Rücken bestand, sowie 11% aus sich auflösenden, so verbleiben für die Bearbeitung der Verlagerungsgeschwindigkeit rund 5000 Tröge und Rücken.

## II. Klimatologie der Tröge und Rücken

### a) Häufigkeitsverteilung längs 55°, Andauer und Neubildung

Abb. 1 zeigt zunächst die Häufigkeitsverteilung der Tröge und Rücken entlang 55°N. Sehr deutlich hebt sich ein scharfer Häufigkeitstypus bei den Rücken in 120°W ab, bei den Trögen in 70°W. Diese beiden Gipfel entsprechen den quasistationären Druckgebilden an der Westküste (Rücken) sowie an der Ostküste (Trog) Amerikas. Weniger deutlich treten die asiatischen quasistationären Druckgebilde hervor. Über dem Atlantik und Europa zeigen kleinere Spitzen, daß dort solche Bevorzugung der Druckgebilde, wie z. B. über Amerika, nicht auftritt. Tab. 1 bringt eine Aufgliederung nach Jahreszeiten. Über Amerika treten keine Unterschiede zutage, der Gipfel an der asiatischen Ostküste beim Trog wandert dagegen im Frühjahr und Sommer weiter nach Osten. Für Europa ergibt die Aufgliederung in den einzelnen Jahreszeiten herausragende Gipfel, aber im Jahresverlauf verwischen sich diese da keine einheitlichen Verhältnisse wie über Amerika herrschen.

Rechnet man die Anzahl der Tage zusammen, an denen über dem amerikanischen Westen (135 — 95 W) ein Rücken aufzufinden ist, so kommt man zu einem Mittel von 282 Tagen, also rund 9 Monate im Jahr, beim Trog im amerikanischen Osten (95 — 45 W) zu 281 Tagen. Für Asien und Europa errechnet man vergleichbare Zahlen mit 234 bzw. 243 Tagen für die Rücken und 235 bzw. 238 Tage für die Tröge. Sie liegen also weit niedriger.

Wenn man Tröge und Rücken mit einer Amplitude unter 20 gpm ausschaltet (Tab. 1), tritt keine Ver-

**Tab. 1 Jahreszeitliche Häufigkeit der Tröge und Rücken in Abhängigkeit von der geogr. Länge in 55° N-Breite.**

	180	160	140	120	100	80	60	40	20	0 West*)									
a)	21	27	19	36	38	29	26	29	46	58	63	48	43	42	41	33	33	33	
b)	39	51	55	39	30	31	17	36	31	37	49	70	63	36	43	24	40	38	53
c)	66	55	39	45	36	46	32	27	31	36	55	78	40	40	46	58	52	49	38
d)	52	49	49	45	38	22	15	30	30	37	59	63	42	39	44	48	63	43	38
e)	178	182	162	165	142	128	89	119	121	156	221	274	193	158	175	171	188	163	162
f)	160	164	148	152	122	95	59	87	101	134	207	239	183	148	167	156	175	148	140
a)	30	54	57	43	31	45	59	37	35	24	28	23	42	32	51	44	34	46	59
b)	35	22	35	29	35	52	75	58	43	39	21	24	40	32	47	44	60	57	47
c)	22	45	35	35	57	43	69	44	67	29	18	29	50	54	44	38	41	53	43
d)	29	38	34	19	31	50	67	56	47	31	25	23	39	49	53	36	50	28	48
e)	116	159	161	126	154	190	270	195	192	123	92	99	171	167	195	162	185	184	197
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180 Ost									
a)	33	46	30	26	38	42	33	43	33	27	15	16	26	54	47	74	47	32	21
b)	53	53	52	38	32	40	37	39	36	42	35	20	43	48	37	43	48	48	39
c)	38	38	47	54	54	39	43	36	53	51	41	47	52	41	30	19	31	46	66
d)	38	46	29	27	35	32	33	42	48	38	16	25	48	64	42	36	26	39	52
e)	162	183	158	145	159	153	146	160	170	158	107	108	169	207	158	172	152	165	178
f)	140	156	129	115	126	121	135	137	144	130	87	78	130	175	135	162	138	152	160
a)	59	38	42	43	36	36	37	24	85	42	52	44	24	20	16	13	20	23	30
b)	47	36	30	44	55	45	54	39	41	53	48	37	33	27	25	33	42	38	35
c)	43	50	55	61	37	51	59	42	42	39	44	50	38	48	53	45	35	26	22
d)	48	43	58	58	39	39	34	25	34	39	51	52	30	24	33	47	29	44	29
e)	197	167	185	206	167	171	184	130	152	173	195	183	125	119	127	138	126	131	116

a) Winter, b) Frühling, c) Sommer, d) Herbst, e) Jahr, f) Amplituden < 20 gpdm ausgeschaltet

\*) jeweils 10 Einheiten zu einer Klasse zusammengefaßt (z. B. 65 bis 66W = 60W).

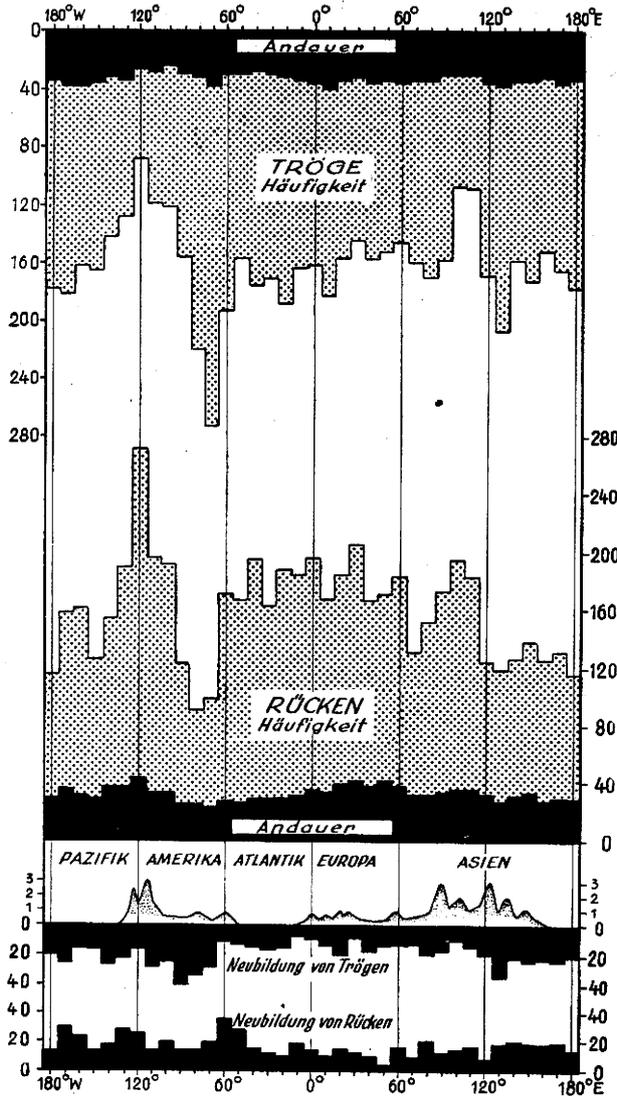


Abb. 1  
Häufigkeitsverteilung, Andauer und Neubildung der Tröge und Rücken längs 55° N (Dezember 1948 — November 1951).

änderung der Häufigkeitsverteilung auf. Das bedeutet aber, daß die Gipfel z. B. über Amerika nicht auf das häufige Auftreten kleiner Wellen zurückzuführen sind.

Um einen Anhaltspunkt über die Andauer eines Troges bzw. Rückens zu bekommen, wurde die Häufigkeit der individuellen Tröge und Rücken entlang 55° N für die gleichen 10° Abschnitte ausgezählt. Das Verhältnis

$$\frac{\text{allgemeine Häufigkeit}}{\text{indiv. Häufigkeit}}$$

ergibt dann ein Maß (in Tagen), wie lange ein Einzeltrög bzw. -rücken im Mittel über einem solchen Abschnitt andauert (lokale Andauer). Das Resultat ist ebenfalls in Abb. 1 niedergelegt. Überraschenderweise sind bei den Trögen diese Mittelwerte fast durchwegs gleich, z. B. für 60—80° W zusammengefaßt beträgt er 1,7 Tg., was dem Breitenkreismittel entspricht. Wir müssen daher schließen, daß der Häufigkeitsgipfel für den ostamerikanischen Trog nicht dadurch entsteht, daß sich ein Trog bildet, der über diesem Gebiet stationär wird, sondern dadurch, daß besonders häufig Tröge durch dieses Gebiet wandern und damit zu dem Maximum in der Häufigkeit führen. Bei den Rücken liegen die Verhältnisse anders. Hier übertrifft die lokale Andauer für 130° W

bis 110° W das Mittel um 0,3 Tage. Damit können wir folgern, daß hier stationäre Anteile häufiger sind, so daß an der amerikanischen Westküste häufiger Rücken auftreten. Bemerkenswert ist noch, daß beim Trog in jahreszeitlicher Untergliederung über Japan im Sommer eine lokale Andauer von 2,8, im Winter von 2,6 Tagen auftritt. Infolge der jahreszeitlichen Verschiebung der Häufigkeitsgipfel geht sie jedoch für den Jahresdurchschnitt verloren. Für den Trog der amerikanischen Ostküste ergibt aber auch eine Unterteilung nach Jahreszeiten kein Anzeichen für das Auftreten länger anhaltender stationärer Wellen. Beim Rücken im amerikanischen Westen haben wir für Winter und Sommer eine lokale Andauer von 2,5 Tagen, denselben Wert über Asien. Dies beweist den größeren Anteil stationärer Gebilde.

In Abb. 1 wurde nun weiter die Neubildung der Tröge und Rücken, deren allgemeine Dauer mindestens 3 Tage betrug, dargestellt. Diese Abbildung erhärtet die in obigem Abschnitt gewonnenen Ergebnisse. Deutlich zeigt sich ein Gipfel bei 90° W, also unmittelbar westlich des Troges an der amerikanischen Ostküste; hier bilden sich also die den quasipersistenten ostamerikanischen Trog zusammensetzenden Einzeltröge neu aus. Der Gipfel ist um die Hälfte höher als der entsprechende für die Rückenbildung in 130° W. In Asien fallen diese Gipfel mit jenen der Häufigkeit des Auftretens zusammen. Bei normaler Westdrift müßte aber, da wir nur Tröge mit längerer Dauer betrachten, die Häufigkeit östlich davon etwa denselben Wert haben. Da dies nicht der Fall ist, muß man schließen, daß wenigstens stationäre Tröge in 130° E auftreten. Die jahreszeitliche Untergliederung bestätigt dann auch die Richtigkeit dieser Folgerung. Überraschend wird zunächst der Gipfel bei der Rückenneubildung in 60° W (Golfstromgebiet).

Hier zeigt die jahreszeitliche Unterteilung, daß der Hauptteil davon auf den Winter und das Frühjahr fällt. So dürfte diese Neubildung auf Warmluftvorstöße zurückzuführen sein, deren Transport nach Norden durch den warmen Untergrund begünstigt wird, ausgelöst durch Kaltluftausbrüche im Gebiet westlich davon. Auch der Gipfel bei 170° W auf dem Pazifik könnte auf diese Weise zustandekommen.

Während für die Rückenneubildung in 120° W wahrscheinlich die Ursache in der Orographie zu finden ist (vgl. Flohn (12)), hängen die Trogneubildungen über dem Ostteil Amerikas und Asiens sicher mit Kaltluftausbrüchen zusammen, die nach Flohn (11) besonders diese Gebiete bevorzugen. Da hierfür kein besonderer Anlaß vorliegt, liegt es nahe, an sekundäre Auflösung im Lee durch den erstgenannten Vorgang zu denken (vgl. 12).

b) Häufigkeit der Blockierung

Tab. 2 bringt einen Überblick über das Stationärwerden bzw. den Beginn der Rückläufigkeit der Tröge und Rücken, die Blockierung. Für je 30° Länge zusammengefaßt sind hier jene Fälle ausgezählt, für die ein Trog oder Rücken für 3 Tage eine mittlere Geschwindigkeit von +10 bis -10 pro Tag (stationärer Fall) bzw. eine mittlere Geschwindigkeit von  $c < -1$  Grad annahm, wobei mindestens 2 Tage rückläufige Geschwindigkeit haben mußten (rückläufiger Fall). Diese „Blocking“-Fälle spielen gerade für die Mittelfristprognose eine Rolle, ihre Definition hier ist jedoch verschieden von der in den Arbeiten von Rex (22). Siehe auch Kap. IV.

Markant ist die häufige Blockierung an der Westküste Amerikas für Trog und Rücken. Die Blockierung der Rücken tritt über dem Gebirge auf, die der Tröge über dem Meere westlich davon. Dieser Effekt dürfte orographisch bedingt sein. Die Tröge verlang-

Tab. 2 Häufigkeit der Blockierung in Abhängigkeit von der geographischen Länge.

(je 30° zu einer Klasse zusammengefaßt)

	180	150	120	90W	60	30	0	30E	60	90	120	150	180	Grad
a	9	16	4	9	13	14	14	14	10	9	11	10	9	Trog
b	27	27	9	11	23	18	19	12	7	11	16	28	27	
c	36	43	13	20	36	32	33	26	17	20	27	38	36	
a	6	14	16	5	1	9	12	16	11	9	3	7	6	Rücken
b	14	19	35	11	6	7	20	15	18	19	19	18	14	
c	20	33	51	16	7	16	32	31	29	28	22	25	20	
Jahreszeiten														
Wi.	8	10	2	2	8	9	3	4	2	3	6	23	8	Trog
So.	14	15	3	5	13	9	7	13	5	7	10	4	14	
Wi.	9	10	10	1	1	1	14	2	3	6	6	3	9	Rücken
So.	6	10	13	7	3	6	11	11	13	9	7	16	6	

- a) = Stationärwerden:  $1 \geq \bar{c} \geq -1$  Grad/Tag;  $\bar{c}$  = Mittel über 3 Tage
- b) = Rückläufigwerden:  $\bar{c} < 0$ , mindestens 2 Tage rückläufig
- c) = Gesamtsumme

samen sich bzw. werden rückläufig, wenn sie an die Gebirgskette kommen, die Rücken bleiben über dieser hängen. Damit ist aber wieder erklärt, warum beim quasistationären Rücken im Westen Amerikas größere stationäre Wellen beteiligt sind.

Auch an der europäischen Westküste besteht die Tendenz zur Blockierung, wie aus den beiden Gipfeln für Trog und Rücken, die natürlich schwächer als über Amerika sind, hervorgeht. Diese beiden Maxima sind vermutlich auf den Einfluß der Reibung zurückzuführen. Wie die jahreszeitliche Unterteilung zeigt, haben wir den Hauptanteil der blockierenden Rücken im Sommer und Winter, den der blockierenden Tröge jedoch im Frühjahr und Herbst.

Wie die Tabelle noch lehrt, ist die Neigung zur Blockierung bei den Trögen über den Meeren, bei den Rücken über dem Festland größer. Weiter fallen noch die beiden Gipfel beim Trog an den beiden Ostküsten der Kontinente auf. Hierbei handelt es sich vermutlich um einen Effekt des Untergrundes. Da diese Fälle im Winter und Frühjahr häufig sind, so tritt

offenbar beim Trog beim Übertritt auf das Meer durch Erwärmung von unten her zunächst Verzögerung ein. Für die Blockierung der Rücken (Sommergipfel) an der asiatischen Ostküste könnte man wieder an Auswirkung der Orographie denken.

c) Die Verlagerungsgeschwindigkeit

Die Tabelle 3 gibt Mittelwerte der Verlagerungsgeschwindigkeit und deren jahreszeitlichen Gang wieder. Die Geschwindigkeit ist im Sommer am kleinsten. Während das Mittel im Herbst den größeren Wert aufweist, ergibt eine Unterteilung des Materials in 3 Gruppen, den rechtsläufigen (W→E), stationären und rückläufigen (E→W) Druckgebilden, daß für die erste Gruppe im Winter das Maximum auftritt. Da aber der jahreszeitliche Anteil der 3 Gruppen nicht gleich ist, wie die untere Hälfte der Tabelle zeigt, so tritt im Mittel die größte Verlagerungsgeschwindigkeit im Herbst auf. Die Verlagerungsgeschwindigkeit ist im Durchschnitt rund 65% rechtsläufig, 17% rückläufig und 18% stationär.

Tab. 3 Verlagerungsgeschwindigkeit längs Breitenkreis 55° N

a) Mittelwerte						
		Jahr	Wi.	Fr.	So.	He.
Trog	rechtsl. ( $c > 2$ Grad/Tag)	10.6	11.8	10.4	9.5	10.8
	rüchl. ( $c < -2$ )	-7.7	-8.4	-7.4	-7.3	-7.5
	stationär ( $2 \geq c \geq -2$ )	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2
	insges.	5.6	6.0	5.2	4.7	6.6
Rücken	re.	10.3	11.1	10.3	9.3	10.6
	rü.	-7.8	-8.1	-7.5	-7.6	-7.8
	stat.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	insges.	5.4	6.1	5.2	4.4	6.2
b) Häufigkeit						
Trog	re.	65	64	63	62	70 %
	rü.	17	19	19	17	14 %
	stat.	18	17	18	21	16 %
Rücken	re.	64	65	63	61	68 %
	rü.	17	17	18	17	15 %
	stat.	19	18	19	22	17 %

Tab. 4 Verlagerungsgeschwindigkeit, in atlantischen und kontinentalen Abschnitten

	Am.	Atl.	Eur.	As.	Paz.	
Jahr	6.6	7.5	5.4	5.4	(3.9)	
Wi	7.6	8.4	6.7	5.0	(3.1)	Grad/Tag
Fr.	5.7	7.2	4.4	5.9	(3.8)	Trog
So	5.6	5.7	4.8	4.8	(3.3)	
He	7.2	8.6	6.5	5.9	(5.4)	
<hr/>						
Jahr	6.1	7.4	4.8	5.2	(4.3)	
Wi	8.7	8.7	5.5	4.5	(3.8)	
Fr.	5.2	5.8	4.5	6.3	(4.2)	Rücken
So	4.8	6.1	4.3	4.2	(3.3)	
He	6.3	9.2	4.8	5.8	(5.5)	
<hr/>						
<b>Häufigkeit (Jahr)</b>						
rechtsl.	68	73	67	64	55%	Trog
rüchl.	15	12	14	17	25%	
stat.	17	15	19	19	20%	
<hr/>						
rechtsl.	67	74	63	64	56%	Rücken
rüchl.	17	12	15	18	21%	
stat.	16	14	22	18	23%	

**Geschwindigkeit der rechtsläufigen Tröge und Rücken**

Wi	12.5	13.4	10.6	11.0	11.4	Grad/Tag Trog
So	10.4	10.1	8.7	9.2	9.3	
Wi	12.7	12.6	10.3	9.9	11.8	Grad/Tag Rücken
So	9.4	9.6	8.2	9.8	10.0	

**Zonalgeschwindigkeit**

Jahr	149	174	110	126	gpm
	10.9	12.9	8.1	9.3	m/sec
	39.6	46.3	29.3	33.5	km/h
Amerika	130 W — 60 W				
Atlantik	60 W — 10 W				
Europa	10 W — 60 E				
Asien	60 E — 140 E				
Pazifik	140 E — 130 W				

Aus Tab. 4 können Mittelwerte der Geschwindigkeit für Trog und Rücken über verschiedenen Räumen entnommen werden. Die Geschwindigkeit über dem Atlantik beträgt 20% mehr gegenüber Amerika und 40—50% gegenüber Europa. Die geringe Geschwindigkeit über dem Pazifik sei hier außer Betracht gelassen, da die Zusammensetzung aus den oben erwähnten 3 Gruppen ein wesentlich anderes Bild ergibt als bei den übrigen Räumen, ihre Realität muß daher bezweifelt werden. Möglicherweise sind die Wetterkarten (15) über diesem Gebiet zu ungenau, so daß hier exakte Ergebnisse nicht möglich waren. Es kann sein, daß bei schnell wandernden Druckgebilden Rückläufigkeit oder Stationärbleiben vorgeäußt wurde, so daß in Wirklichkeit statt eines Wertes mit rückläufiger Geschwindigkeit ein rasches Abwandern eingesetzt werden muß.

Im ersten Augenblick ist man geneigt (10), die größere Geschwindigkeit über dem Atlantik mit der Bodenreibung in Verbindung zu setzen. Eine nähere Untersuchung ergibt aber einen ähnlichen Unterschied bei der Zonalgeschwindigkeit (s. Tabelle). So kommt man zu dem Schluß, daß der Einfluß der Bodenreibung über die Bewegung der beteiligten Luftmassen geht. Auch wenn man Wellenlänge und Am-

plitude nach den Ergebnissen des Kapitels III in Rechnung setzt, bleibt die größere Verlagerungsgeschwindigkeit primär eine Folge der höheren Zonalgeschwindigkeit.

Tab. 5 Verlagerungsgeschwindigkeit in Abschnitten zykl. und antizykl. Krümmung

	zykl. Bereich		antizykl. Bereich		
	Grad/Tag	%	Grad/Tag	%	
Trog	re	10.8	67	8.6	67
	rü	-7.7	16	-7.3	15
	st	0.3	17	0.0	18
	re	10.7	68	10.2	65
	rü	-7.7	15	-7.6	16
	st	0.2	17	0.3	19

zykl. 100 W — 40 W      antizykl. 140 W — 100 W  
 zykl. 20 E — 60 E      antizykl. 40 W — 20 E  
 zykl. 100 E — 140 E      antizykl. 60 E — 100 E

Die Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte der Geschwindigkeit, wenn man die Einteilung nach den quasistationären Anomalien der Westdrift vornimmt und die Gebiete mit vorwiegend zyklonaler und antizyklonaler Krümmung der Isohypsen zusammenfaßt. Im antizyklonalen Bereich sind die Geschwindigkeiten der Tröge und Rücken rund 15—20% niedriger. Dies beruht auf 2 Ursachen. Bei den Trögen wandern im zyklonalen Bereich die rechtsläufigen schneller als im antizyklonalen Bereich, was in der Gesamtsumme zu einer größeren Verlagerungsgeschwindigkeit führt; bei den Rücken aber liegt es im wesentlichen an der größeren Häufigkeit stationärer und rückläufiger Anteile im antizyklonalen Bereich.

d) Mittelwerte für L, A, S und U.

Als wesentlicher Faktor geht in der Formel von Rossby die Zonalgeschwindigkeit U ein. Wie bekannt, weist sie einen ausgesprochenen jahreszeitlichen Gang auf, den man auch bei der Verlagerungsgeschwindigkeit verfolgen kann. Tab. 6 läßt aber erkennen, daß auch die anderen Elemente (nicht aber die Schiefe) einen jahreszeitlichen Gang besitzen. Wellenlänge und Amplitude nehmen vom Sommer zum Winter hin zu. Beide Faktoren sind der Wirkung der Zonalgeschwindigkeit entgegengerichtet (siehe Rossby-Formel und Kap. III). Damit tritt bei c eine Dämpfung des jahreszeitlichen Ganges ein. Die Mittelwerte für eine räumliche Unterteilung nach 4 Gebieten, welche rund 90° Länge umfassen (Europa, Asien, Pazifik und Amerika) gibt die untere Hälfte der Tabelle 6 wieder. Bei den Trögen finden wir in Europa die kleinste Wellenlänge sowie die kleinste Amplitude. Bei letzterer ragt jedoch nur Amerika heraus, während sonst die mittlere Amplitude ziemlich gleich ist. Bei den Rücken bestehen zwischen Europa und Pazifik einerseits, Amerika und Asien andererseits etwas größere Unterschiede. Bei der Wellenlänge fällt hier Amerika heraus. Schwer zu erklärende regionale Unterschiede zeigt auch noch die Schiefe.

Tab. 6 Mittelwerte von c, L, A, S und U

a) jahreszeitlich getrennt

		c Grad/Tag	L Grad	A gpdm	S %	U <sub>360</sub> Grad/Tag	U <sub>E</sub> Grad/Tag
Trog	Wi	6.0	78	62	51	15.0	16.4
	Fr	5.2	69	50	52	12.3	12.7
	So	4.7	65	40	51	10.5	10.9
	He	6.6	71	54	52	14.5	13.6
	Jahr	5.6	70.3	50.6	51.4	13.1	13.4
Rücken	Wi	6.1	78	63	49		
	Fr	5.2	70	51	49		
	So	4.4	64	39	49		
	He	6.2	72	54	49		
	Jahr	5.4	70.6	50.8	49.1		

b) räumlicher Unterschied (Jahresmittel)

		c	L	A	S	L <sub>W</sub>	L <sub>E</sub>	
Trog	Am	7.0	71	55	53	37	34	$U_A = 15.1$ $U_E = 13.4$ $U_H = 14.1$ $U_H' = 12.1$ $U_{360} = 13.1$ Grad/Tag
	Eur	5.8	63	48	47	30	33	
	As	5.2	73	49	56	41	32	
	Paz	4.1	76	50	50	37	39	
Rücken	Am	7.2	64	45	49	32	32	
	Eur	5.3	71	57	51	35	36	
	As	4.9	72	43	43	30	42	
	Paz	4.3	74	54	52	38	36	

Am 120 W — 40 W  
 Eur 40 W — 60 E  
 As 60 E — 150 E  
 Paz 150 E — 120 W

U<sub>360</sub> = Zonalgeschwindigkeit für Breitenkreis  
 U<sub>E</sub> = „ „ Europa  
 U<sub>A</sub> = „ „ Amerika  
 U<sub>H</sub> = „ „ Amerika + Europa  
 U<sub>H'</sub> = „ „ Asien + Pazifik

Tab. 7a Häufigkeitsverteilung der Schiefe

	<30	33—44	45—55	56—70	>70	% Schiefe
	westlich		symmetr.		östlich	
<b>Tröge</b>						
Amerika	6.1	22.6	26.1	33.6	11.6	% „
Europa	8.4	37.0	28.2	21.2	5.2	% „
Asien	4.0	17.2	25.2	38.3	15.3	% „
Pazifik	6.7	28.4	27.5	29.9	7.5	% „
<b>Rücken</b>						
Amerika	9.5	28.5	25.1	31.5	5.4	% „
Europa	8.6	22.3	30.3	30.5	8.3	% „
Asien	14.4	39.2	28.8	14.6	3.0	% „
Pazifik	5.5	23.6	29.7	33.3	7.9	% „

Tab. 7b

Häufigkeitsverteilung der Schiefe im Europasektor  
 (Trog)

	westl.	symm.	östl.	n
40—20 Grad W	55	26	19%	327
20—0 „ W	55	25	20%	328
0—20 „ E	51	27	22%	354
20—40 „ E	45	26	29%	290
40—60 „ E	33	30	37%	327

Tab. 7a stellt das Ergebnis einer Häufigkeitsauszählung der Schiefe S, getrennt nach 4 Räumen, dar. Nur rund ¼ aller Tröge und Rücken sind annähernd symmetrisch. Über Amerika und Asien sind rund die Hälfte der Tröge östlich schief, dagegen nur ¼ westlich, während sich in Europa dieses Verhältnis umkehrt; Rücken östlicher Schiefe überwiegen über Europa.

Der europäische Sektor wurde daher für die Tröge einer näheren Betrachtung unterzogen und in Teilabschnitte von 20° Länge gegliedert, unter Hinzu-

nahme der nichtpersistenten und sich auflösenden Tröge. Wie Tab. 7b lehrt, nimmt landeinwärts die östliche Schiefe kontinuierlich zu, dafür die westliche ab. Daraus erklärt sich der Gegensatz zwischen den Räumen. Eine Ursache für diese offensichtliche Abhängigkeit von der Unterlage (Land oder Meer) konnte bisher noch nicht gefunden werden. Immerhin sind über dem Atlantik noch 1/5 aller Tröge östlich schief, umgekehrt verschwindet auch die westliche Schiefe landeinwärts nicht voll.

e) Häufigkeitsverteilungen

Tabelle 8 enthält Angaben über die Häufigkeitsverteilung der Verlagerungsgeschwindigkeit. Teil a) bringt die Häufigkeitsverteilung für das Gesamtmaterial sowie die statistischen Maßzahlen dafür.

Die statistische „Schiefe“, definiert\*) als  $\frac{1}{N} \frac{\sum y_i x_i^3}{\sigma^3}$  —

nicht zu verwechseln mit der Schiefe der Wellen, die ein Quotient der Wellenlänge ist — beträgt zwar nur

Tab. 8 Häufigkeitsverteilung der Verlagerungsgeschwindigkeit

a) Jahreskurve, Häufigkeitsverteilung (in %)

	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30*)	n	Mittel	$\sigma$	S	E
Trog	0.2	2.0	5.0	9.9	18.0	23.1	20.8	12.2	6.4	1.9	0.5	4915	5.6	8.8	-0.07	-0.08
Rücken	0.3	1.8	5.7	9.0	19.1	23.5	20.5	12.5	5.5	1.8	0.3	4961	5.4	8.6	-0.07	-0.08

$\sigma$  = Streuung                      S = Schiefe                      E = Exzeß

b) Aufgliederung in Gaußsche Normalverteilungen

	Trog			Rücken		
	Mittel	$\sigma$	n	Mittel	$\sigma$	n
A	-11.0	4.1	6%	-9.0	4.7	9%
B	-2.0	4.6	23%	-1.0	5.1	18%
C	4.5	3.8	32%	3.5	4.0	32%
D	11.0	3.8	25%	11.0	4.2	30%
E	18.0	4.8	14%	18.0	5.3	11%

c) Häufigkeitsverteilung nach Jahreszeiten aufgeteilt (für Tröge)

	-25	-20	-15	-10	-5	Mittel	+5	+10	+15	+20	+25*)	n	Mittel
Wi	0.9	3.4	6.7	11.2	17.4	19.7	18.6	11.3	7.5	2.9	0.4%	1088	6 Grad/Tag
Fr	0.2	1.8	5.9	11.5	18.0	23.6	18.0	12.7	6.7	1.4	0.2%	1229	5
So	0.2	1.7	4.6	10.5	20.8	26.1	20.6	9.9	4.6	0.8	0.2%	1367	5
He	0.3	2.8	4.5	10.3	19.5	22.3	23.3	10.7	4.7	1.4	0.2%	1221	7

d) Aufteilung nach Räumen (für Tröge)

	-25	-20	-15	-10	-5	Mittel	+5	+10	+15	+20	+25*)	n	Mittel
Am	0.7	3.0	5.3	8.9	18.0	21.7	21.5	12.5	6.3	1.9	0.2%	1219	7
Eur	0.5	1.7	4.3	10.2	20.0	26.5	21.7	9.4	4.3	1.2	0.2%	1437	6
As	0.1	2.4	5.3	10.2	19.1	23.8	18.6	11.6	6.7	1.8	0.4%	1145	5
Paz	0.2	1.8	6.2	12.9	17.7	23.3	17.4	11.2	6.1	2.9	0.3%	1114	4

\*) Jeweils 5 Einheiten zu einer Klasse zusammengefaßt (z. B. +13 bis +17).

-0,07, doch beträgt der mittlere Fehler hierfür nur  $\pm 0.003$ . Wir haben also eine linksseitig schiefe Verteilung vorliegen, was auch aus der Häufigkeitsverteilung selbst deutlich zu erkennen ist. Für beide Kurven ist der mittlere Fehler des Exzesses (Exzeß definiert\*) als  $\frac{1}{N} \frac{\sum y_i x_i^3}{\sigma^3}$  —3) von derselben Größen-

ordnung wie dieser selbst. Die Abweichungen vom Mittelwert entsprechen daher etwa der einer Gaußschen Normalverteilung. Um ein anschauliches Bild von diesen Häufigkeitsverteilungen zu gewinnen, deren statistische Maßzahlen sich nur wenig unterscheiden, wurde nach einer vom Autor (9) entwickelten Methode eine Aufteilung in Gaußsche Normalverteilungen vorgenommen (Tab. 8b). Die verschie-

denartigen Abweichungen von einer Gaußschen Normalkurve bei Trog und Rücken kommen in den Unterschieden der 5 Einzelkollektive zwischen beiden Aufteilungen zum Ausdruck. Das Hauptkollektiv C, das rund 30% der Werte umfaßt, darf man sich als die normal rechtslaufenden Tröge und Rücken vorstellen. Die Teilkollektive B mit Mittelwert -2 bzw. -1 Grad/Tag entsprechen etwa den stationären Gebilden. Die anschließenden Kollektive D und A charakterisieren schnell rechts- bzw. rückwärtslaufende Wellen, während das letzte Kollektiv E sehr schnell rechtslaufende darstellt.

Man entnimmt der Aufteilung, daß bei Trog und Rücken die schnellwandernden Wellen (Kollektive D und E) in den Mittelwerten übereinstimmen. Das Hauptkollektiv C läßt den Schluß zu, daß Tröge etwas schneller wandern als Rücken. Dafür sind aber auch die rückwärtslaufenden Tröge schneller. Auch im Kollektiv B für stationäre Wellen ergibt sich für die Tröge eine etwas stärkere Tendenz zur West-

\*) nach Linkes Meteorologischem Taschenbuch, Bd. IV  $x_i$  = Abweichungen der x-Werte vom Mittelwert  $\bar{x}$ ,  $y_i$  = Häufigkeit für  $x_i$ ,  $N = \sum y_i$ ,  $\sigma$  = Streuung, n = Anzahl der Klassen.

bewegung als für Rücken. In Tab. 4 wurde das stationäre Kollektiv anders definiert, aber man kommt auch dort zu einem Anteil von etwa 20%.

In Tab. 8 c und d wird, nach Jahreszeiten und Räumen aufgeteilt, die Häufigkeitsverteilung wiedergegeben, wenn man vom Mittelwert aus beginnend jeweils 5 Werte zu einer Klasse zusammenfaßt (Mit-

telwert  $\pm 2$ ). Ein Vergleich zeigt, daß Frühjahr und Sommer etwa symmetrischen Aufbau besitzen, während im Herbst eine deutliche Verschiebung des häufigsten Wertes festzustellen ist. Natürlich ergeben sich auch jahreszeitliche Unterschiede des häufigsten Wertes, ebensolche Verschiedenheiten bringt die Aufteilung nach Räumen.

Tab. 9

a) Häufigkeitsverteilung der Wellenlänge L

	15	25	35	45	55	65	75	85	95	100	115	125	135	145	150 <sup>0*</sup>	Mi	n
Trog	0.1	1.9	7.0	12.6	16.6	16.5	13.1	10.6	8.1	5.3	2.9	1.9	1.3	1.1	1.0%	70	4915
Rücken	0.1	1.7	7.7	12.9	16.3	15.9	12.2	11.0	7.0	5.7	3.7	2.9	1.2	0.7	1.0%	70	4961

b) Häufigkeitsverteilung der Amplitude A

	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	130 <sup>0pdm*</sup>	Mi	n
Trog	1.3	8.3	13.5	14.8	15.7	13.7	10.9	7.9	5.2	4.1	2.2	1.3	0.7	0.4	51	4915
Rücken	1.7	8.6	12.1	16.0	16.1	13.4	9.7	7.7	5.1	3.5	2.8	1.7	0.7	0.9	51	4961

c) Häufigkeitsverteilung der Zonalgeschwindigkeit

	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	Mi	+3	+6	+9	+12	+15	+18	+21	+24 <sup>**</sup>	n
U <sub>360</sub>				0.4	4.4	12.8	24.6	25.0	18.8	9.8	3.6	0.4	0.2			%	1095
U <sub>E</sub>		0.4	0.7	5.6	9.7	13.2	16.7	14.4	12.0	12.8	6.7	3.8	1.9	1.3	0.6	0.2%	1095
U <sub>A</sub>	0.7	0.6	2.9	4.5	7.7	11.3	15.2	15.8	13.8	12.3	8.2	3.9	2.1	0.6	0.4	%	1095
U <sub>H</sub>		0.1	0.5	2.1	6.9	14.3	20.9	19.2	16.1	9.5	6.8	2.6	0.5	0.4	0.1	%	1095

\*) jeweils 10 Einheiten zu einer Klasse zusammengefaßt (Beispiel 55 = 50 bis 60).

\*\*) jeweils 3 Einheiten zu einer Klasse zusammengefaßt.

Der Vollständigkeit halber enthält Tab. 9 (jeweils für das Jahr zusammengefaßt) noch die Häufigkeitsverteilungen von L, A und U. Sie entsprechen in keiner

Weise einer Gaußschen Normalverteilung, doch sei hier nicht weiter darauf eingegangen.

f) Andauer, Auflösung und Neubildung der Wellen

Tab. 10 Andauer der Tröge und Rücken

		a) Häufigkeit in %						b) Andauer Es währen 50% 10% länger als		
Mittl. Dauer		≥3	≥5	≥10	≥20	≥30 Tage				
Trog	Fr.	6.4 "	60	39	19	4	2%	Trog	3.4	13.5 Tage
	So	8.6 "	57	47	29	11	1%		4.0	13.0 "
	He	7.2 "	65	45	24	4	5%		4.2	21.0 "
	Jahr	7.2 "	58	43	23	6	1%		4.5	17.0 "
	Wi	6.0 Tage	51	34	16	4	2%		4.1	16.6 "
Rücken	Fr.	8.1 "	54	38	24	10	2%	Rücken	3.1	14.8 Tage
	So	8.1 "	62	50	28	9	5%		3.6	20.0 "
	He	8.7 "	60	46	41	9	2%		5.0	18.0 "
	Jahr	7.6 "	56	43	24	8	5%		4.4	17.3 "
	Wi	6.6 Tage	52	41	19	5	3%		3.8	17.2 "
c) Mittelwerte										
Andauer		Trog				Rücken				
		C	L	A	S	C	L	A	S	
	≤3 Tg.	6.5	63	41	52	7.7	57	35	48	
	4-10 Tg.	6.2	70	50	52	6.1	67	46	50	
	11-20 Tg.	5.4	74	55	52	5.2	73	54	49	
	21-30 Tg.	5.0	69	49	48	4.5	73	52	48	
	>30 Tg.	4.4	70	51	50	4.2	77	59	48	

Bevor die Beziehungen der einzelnen Parameter zueinander besprochen werden, sei noch kurz über die Andauer der Tröge und Rücken berichtet. Darüber gibt die Tabelle 10 Aufschluß. Aus der mittleren Dauer sieht man zunächst, daß die Druckgebilde im Sommer und Herbst länger erhalten bleiben als im Winter und Frühjahr. Wie die Prozentzahlen der Häufigkeit zeigen, dauern jedoch nur 50% aller Tröge und Rücken länger als 4 Tage. Dies bedeutet, daß man nur in 50% der Fälle ein Weiterbestehen der Druckgebilde über 4 Tage erwarten darf, will man die Rossby-Formel zu einer Mittelfristprognose heranziehen. Geht die Prognose über 3—4 Tage hinaus, kommt man ohne Kenntnis von Trogauflösung sowie -neubildung nicht weiter.

Im Teil c der Tabelle sind die Mittelwerte für verschiedene Gruppen der Andauer zusammengestellt. Der Mittelwert der Verlagerungsgeschwindigkeit sinkt ständig, je länger ein Trog bzw. Rücken besteht. Das heißt aber, daß bei längerer Andauer stationäre oder rückläufige Anteile häufiger auftreten. Rasch wandernde Gebilde sind meist kurzlebig. Die größte mittlere Wellenlänge sowie Amplitude weisen Tröge mit 10—20 Tagen Dauer auf, während Rücken mit größter Wellenlänge sowie Amplitude auch die längste Dauer haben.

Tab. 11

**Zeitlicher Ablauf von c, L, L<sub>w</sub>, A und S für Wellenneubildung sowie -auflösung**

Trog (N = 162)						Rücken (N = 165)				
c	L	L <sub>w</sub>	A	S		c	L	L <sub>w</sub>	A	S
7.6	63	35	41	55	1. Tag	6.6	57	28	36	53
5.9	70	38	44	54	2. Tag	7.0	67	33	47	52
5.3	73	37	53	52	3. Tag	5.1	70	36	52	52
4.1	72	37	56	53	4. Tag	4.8	74	36	54	50
4.4	77	38	58	53	5. Tag nach Neubildung	4.3	75	36	54	49
5.9	74	38	53	51	5. Tag	4.8	74	36	56	48
5.3	75	38	54	50	4. Tag	4.7	74	34	54	47
6.3	72	37	55	50	3. Tag	6.0	79	38	55	48
4.6	69	34	52	50	2. Tag	5.8	73	33	50	47
6.8	66	32	45	48	1. Tag	5.0	67	32	46	48
	57	27	36	46	letzter Tag vor Auflösung	6.0	28	39	47	

Um einen Überblick über das Verhalten der Parameter bei Neubildung und Auflösung der Wellen zu gewinnen, wurde für alle Tröge und Rücken, die

10 Tage und länger persistent blieben, der mittlere zeitliche Ablauf von c, L, L<sub>w</sub>, A und S für die ersten 5 Tage sowie die letzten 5 Tage berechnet (Tab. 11). Wie erwartet, nehmen Wellenlänge und Amplitude bei Neubildung langsam zu, die Geschwindigkeit verläuft entsprechend den Korrelationen (siehe Kap. III). Auch bei der Schiefe läßt sich ein langsamer Rückgang erkennen. Während beim Trog jedoch bereits am ersten Tag die größte Geschwindigkeit auftritt, stellt man beim Rücken diese erst am zweiten Tag fest. Man könnte daraus schließen, daß der Aufbau des Troges (Kaltlufteinbruch) rascher vor sich geht, während der Rücken (Warmluftvorstoß) eine langsamere Entwicklung zeigt. Anfangs herrscht östliche Schiefe offenbar vor, die jedoch gegen Ende mehr einer westlichen weicht.

Auch beim Abbau unterscheiden sich Trog und Rücken. Bei ersterem nimmt die Geschwindigkeit im Mittel wieder zu, vom vorletzten zum letzten Tag vor Auflösung tritt dies in rund 2/3 aller Einzelfälle auf. L, L<sub>w</sub>, A und S nehmen ab. Die Abnahme von S weist auf den Vorgang der Auffüllung des Troges durch den nachfolgenden Rücken hin. Beim Rücken zeigt die Untersuchung der Einzelfälle, daß nur bei 1/3 eine Geschwindigkeitszunahme eintritt, so daß die geringe Abnahme des Mittelwertes von der Mehrzahl der Fälle gestützt wird. Auch die Schiefe ändert sich nur unmerklich; dies bedeutet wohl, daß der Rücken in sich selbst abbaut.

**III. Korrelationen (Rossby-Formel)**

**a) Einfachkorrelationen**

In diesem Abschnitt wird auf die Korrelation der einzelnen Parameter zueinander und den Zusammenhang mit der Rossby-Formel eingegangen; Auszüge daraus sind bereits in einer kleineren Arbeit (8) erschienen. In Tab. 12 sind L, A, S und U als Funktion von c zusammengestellt. Kurz läßt sich sagen: lange Welle, hohe Amplitude und östliche Schiefe ergeben langsame, kurze Welle, kleine Amplitude und westliche Schiefe dagegen große Verlagerungsgeschwindigkeit.

In Abbildung 2 wird c, A und S als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Während die Amplitude mit wachsender Wellenlänge für Trog und Rücken ansteigt, zeigt sich bereits, daß die Kurve für die Schiefe bei Trog und Rücken invers verläuft. Beim Trog müssen wir bei langen Wellen östliche Schiefe erwarten, beim Rücken aber westliche. Für beide Wellen nimmt c bis zu einem Tiefstwert ab und dann wieder zu. Auf diese Erscheinung wird später noch näher eingegangen.

Tab. 12

**Korrelationstabelle für L, L<sub>w</sub>, L<sub>E</sub>, A, S und U<sub>360</sub> als Funktion der Verlagerungsgeschwindigkeit c**

c	Trog							n	c	Rücken							n
	L	L <sub>w</sub>	L <sub>E</sub>	A	S	U <sub>360</sub>	L			L <sub>w</sub>	L <sub>E</sub>	A	S	U <sub>360</sub>			
-15	80	44	36	53	55	13.9	110	-15	80	43	37	50	53	13.6	104		
-10	80	44	36	54	55	13.0	247	-10	76	39	37	50	52	12.7	282		
-5	76	42	34	53	54	12.4	488	-5	76	38	38	54	51	12.2	446		
0	70	37	33	52	52	12.2	884	0	75	36	39	56	50	12.5	947		
5	69	36	33	52	51	12.5	1134	5	72	35	37	55	49	12.5	1166		
10	67	34	33	50	50	13.1	1022	10	67	32	35	50	48	12.9	1019		
15	68	35	33	48	50	13.5	599	15	64	31	33	45	48	13.7	621		
20	66	33	33	42	49	13.6	316	20	64	29	35	41	47	14.5	271		
25	69	33	36	43	46	14.4	115	25	60	25	35	35	42	13.7	105		

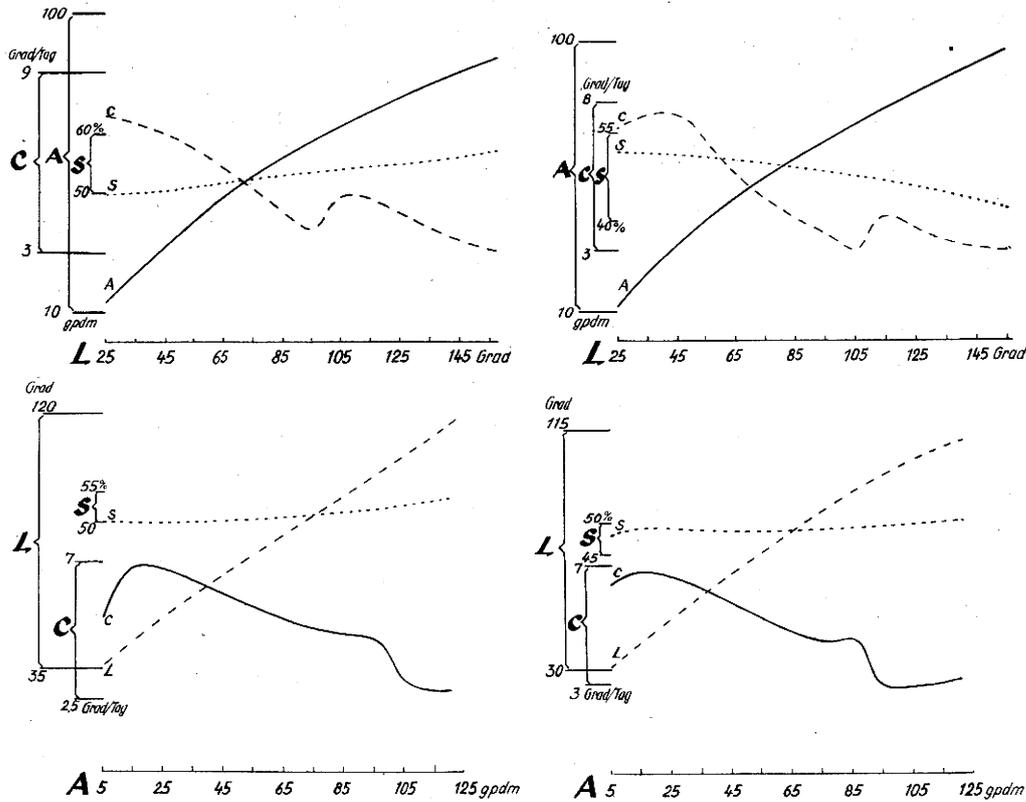


Abb. 2

Oben:  $c$ ,  $A$  und  $S$  als Funktion der Wellenlänge  $L$ ,  
unten:  $c$ ,  $L$  und  $S$  als Funktion der Amplitude  $A$ .  
Links: Trog, rechts: Rücken.

Die untere Hälfte der Abbildung bringt die Abhängigkeit von  $c$ ,  $L$  und  $S$  von der Amplitude. Wenn auch eine gewisse Parallelität mit der Wellenlänge besteht, so zeigen doch die folgenden Abbildungen, daß die Amplitude einen eigenen Einfluß besitzt. Diesen hat inzwischen H o l l m a n n (13) auch theoretisch abgeleitet; in seine Formel geht allerdings

der vertikale Aufbau des Troges ein, während hier nur die Größe  $A$  der Amplitude in 500 mb maßgebend ist. So kann ein Vergleich mit den Ergebnissen leider nicht durchgeführt werden. Aus der vorliegenden Darstellung läßt sich keine Abhängigkeit der Schiefe von der Amplitude erkennen.

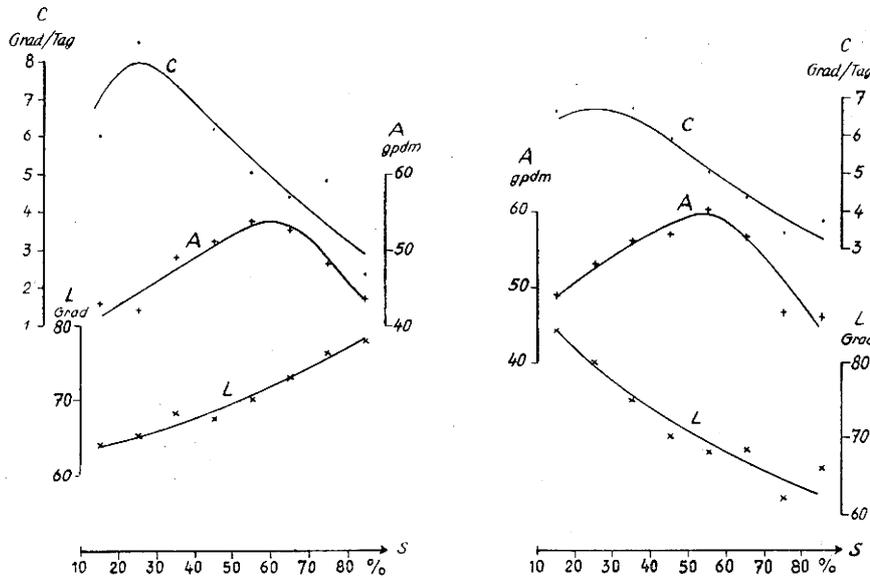


Abb. 3

$c$ ,  $A$  und  $L$  als Funktion der Schiefe  $S$ .  
Links: Trog, rechts: Rücken.

Erst in Abbildung 3, auf der  $c$ ,  $L$  und  $A$  als Funktion der Schiefe zu sehen sind, tritt eine Beziehung deutlich hervor. Die Amplitudenkurve fällt nach

beiden Seiten hin ab, die symmetrischen bzw. leicht östlich schiefen Wellen haben im Durchschnitt die größten Amplituden. Die Geschwindigkeitskurve

zeigt bei rund 30% ein Maximum und fällt dann ab. Bei den Trögen ist der Wert bei 30% mehr als doppelt so groß wie bei 70%. Dies beweist den merklichen Einfluß der Schiefe auf die Verlagerungsgeschwindigkeit. Die Abhängigkeit von  $c$  von der Wellenform, wie sie hier empirisch ermittelt wurde, steht in Übereinstimmung mit einer theoretischen Untersuchung von Lönqvist (16). Wie bereits gezeigt, sind nur  $\frac{1}{4}$  aller Tröge und Rücken symmetrisch; die Annahme reiner Sinuswellen bei theoretischen Untersuchungen ist daher nicht gerechtfertigt.

Die Kurven für  $L$  laufen bei Trog und Rücken eindeutig invers, wie schon aus dem vorherigen Bild zu entnehmen war. Daraus ergibt sich für lange Wellen, daß beim Trog  $L_W > L_E$ , beim Rücken jedoch  $L_W < L_E$  ist. Nach der Rossby-Formel (auch den Korrelationen für  $L$ ) resultiert für längere Wellen eine geringere Geschwindigkeit. So steht beim Trog die  $L$ -Kurve im Einklang mit der Geschwindigkeitskurve, beim Rücken jedoch nicht. Dies kommt dadurch zum Ausdruck, daß die  $c$ -Kurve beim Rücken einen gedämpften Verlauf aufweist, wie man bei einem Vergleich leicht feststellen kann.

Tab. 13  
Korrelationstabelle für  $c, L, A$  und  $S$  als Funktion von  $L_W$

$L_W$	Trog					Rücken					
	$c$	$L$	$A$	$S$	$n$	$L_W$	$c$	$L$	$A$	$S$	$n$
15	7.9	44	29	36	755	15	7.8	46	29	36	759
25	6.8	56	41	46	1234	24	7.6	58	41	45	1386
34	5.3	68	53	52	1161	38	5.1	75	53	51	1292
44	3.8	79	59	57	719	44	2.5	84	63	55	717
53	3.7	88	63	62	474	51	2.4	93	73	58	431
64	3.7	101	68	62	256	63	1.8	105	77	62	212
74	5.0	113	70	67	154	73	3.8	120	83	63	99
82	4.1	124	74	68	79	90	3.6	136	80	67	65
101	2.2	148	93	69	83						

Tabelle 13 bringt  $c, A$  und  $S$  als Funktion von  $L_W$ . Für  $L_W$  nimmt  $c$  stärker ab als für  $L$ , was darauf zurückgeführt werden kann, daß in  $L_W$  zwei Parameter stecken, nämlich die Wellenlänge und die Schiefe.  $L_W$  erreicht zwischen 30 und 40° eine Schiefe von 50%. Für größeres  $L_W$  haben wir demnach im Mittel östliche Schiefe, für kleineres westliche. In einigen Arbeiten amerikanischer Autoren (18) wurde daher als Wellenlänge nicht das hier verwendete  $L$ , sondern  $2 \cdot L_W$  benutzt.

Auch hier erreicht die Geschwindigkeit ein Minimum, diesmal zwischen 60 und 70°. Dieses Minimum bei  $L$  und  $L_W$  kann man so deuten, daß man eine bevorzugte Wellenlänge annimmt, bei der ein Blocking-Effekt auftritt. Dies würde die Zunahme der Geschwindigkeit nach beiden Seiten erklären. Auch deckt sich das Ergebnis mit einer theoretischen Untersuchung von Hollmann (13).

Um zu zeigen, daß die hier abgeleiteten Beziehungen wirklich allgemein gelten, wurde eine Trennung nach Jahreszeiten durchgeführt und  $c, A$  und  $S$  als Funktionen von  $L$  für die einzelnen Jahreszeiten dargestellt (Abb. 4). Das bereits beschriebene Minimum stellt sich in allen Jahreszeiten im Kurvenverlauf der Verlagerungsgeschwindigkeit ein, ist also sicher reell. Es liegt im Sommer bei etwas kürzeren Wellenlängen als im Winter. Sonst gleichen die Kurven dem Jahresverlauf. Während die  $S$ -Kurven für Trog und Rücken Bündelung zeigen, also keinen jahreszeitlichen Unterschied kennen, läßt er sich aus der Amplitudenkurve deutlich ablesen.

Um nachzuweisen, ob die bisher abgeleiteten Korrelationen entlang des gesamten Breitenkreises gelten, wurde  $c, L$  und  $A$  als Funktion der Schiefe  $S$ , nach Räumen getrennt, aufgetragen (Abb. 5). Wie bereits ausgeführt, verhält sich die Schiefe in den einzelnen Gebieten unterschiedlich. Bei der Darstellung der Verlagerungsgeschwindigkeit fällt die Kurve für den Pazifik etwas heraus, sie verläuft beim Trog weit aus flacher als die übrigen und gleicht auch beim Rücken nicht den anderen Kurven. Dies kann an

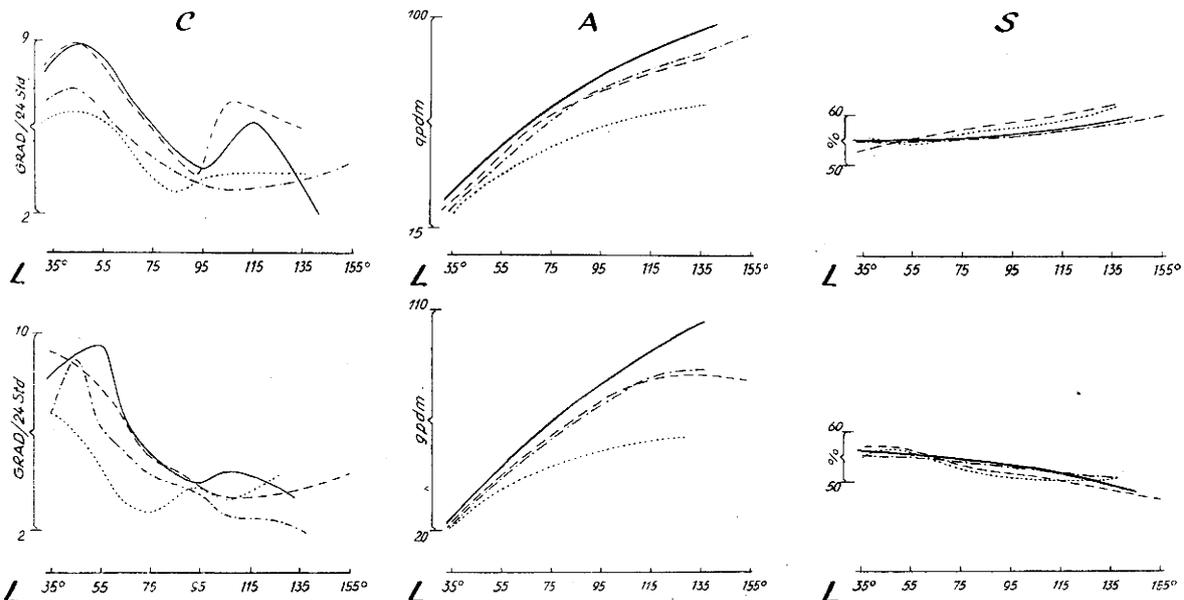


Abb. 4  
 $c, A$  und  $S$  als Funktion der Wellenlänge  $L$ , getrennt nach Jahreszeiten.  
Oben: Trog, unten: Rücken.  
— Winter, - - - Frühling, . . . . Sommer, - · - · - Herbst.

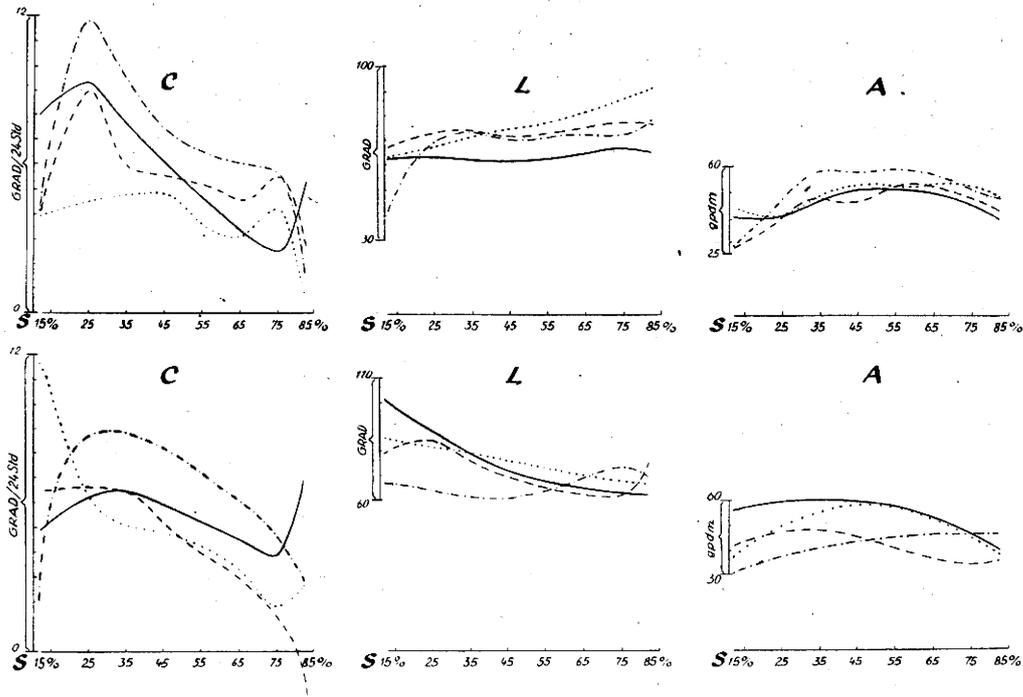


Abb. 5  
c, L und A als Funktion der Schiefe S, getrennt nach Räumen.  
Oben: Trog, unten: Rücken.  
— Europa, - - - Amerika, - · - - - Asien,  
· · · · · Pazifik.

der bereits im vorigen Kapitel erwähnten Unsicherheit des Materials liegen.

In den anderen Räumen verlaufen die Kurven jedoch gleichsinnig. Wir können daher folgern, daß bei Wellenlänge und Amplitude keine wesentlichen Unterschiede auftreten. Schwer deutbar ist lediglich beim Rücken, daß die Beziehung zwischen L und S für Amerika anders als in den übrigen Gebieten ist.

Danach wären über Amerika die kleinsten Wellen beim Rücken symmetrisch, während sonst diese östliche Schiefe aufweisen.

Die Abbildung 6 vermittelt noch die Beziehung zwischen c, L und S als Funktion von  $U_{300}$ , der Zonalgeschwindigkeit des gesamten Breitenkreises. Für ansteigendes U nimmt die c-Kurve zu, wie dies nach der Formel von Rossby erwartet werden muß. Neu ist jedoch, daß auch die Wellenlänge bei großer Zonalgeschwindigkeit länger wird. Es scheint, daß bis zu einem Schwellenwert von rund 12 Grad/Tag (= 35 km/h) kein Einfluß auf die Wellenlänge besteht, darüber aber nimmt die Wellenlänge zu. Das bedeutet, daß eine größere Zonalgeschwindigkeit das Entstehen von kleinen Wellen verhindert.

Auf die Schiefe hat die Zonalgeschwindigkeit jedoch keinen Einfluß. Zur Berechnung der eben dargelegten Korrelationen wurde die Zonalgeschwindigkeit des Breitenkreises benützt. Man erzielt jedoch eine strammere Beziehung, wenn man einen kleineren Bereich für die Zonalgeschwindigkeit nimmt, der in engerer Bindung mit den auftretenden Wellen steht. So wurde für den europäischen Raum ein Wert  $U_E$  berechnet. Dieser wurde sowohl für Europa als auch

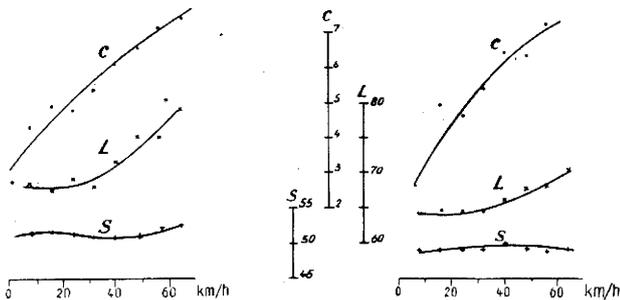


Abb. 6  
c, L und S als Funktion der Zonalgeschwindigkeit U 360.  
Links: Trog, rechts: Rücken.

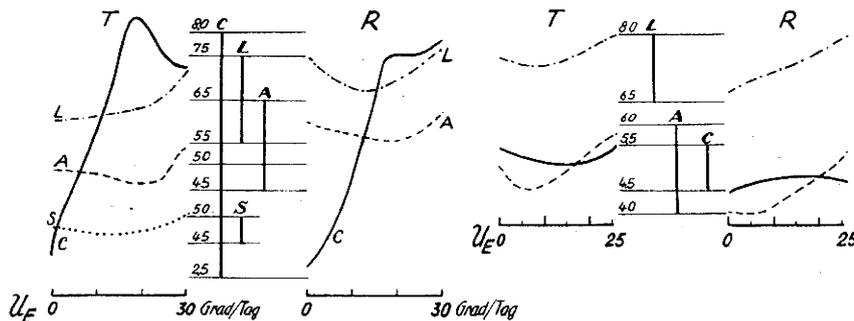


Abb. 7  
c, L und A als Funktion der Zonalgeschwindigkeit  $U_E$  für Europa (links) und Asien (rechts).

für Asien angewandt. Die damit gewonnenen Korrelationen können aus Abbildung 7 abgelesen werden. Der Vergleich der beiden Gebiete läßt folgern, daß die Zonalgeschwindigkeit für c nur bestimmend ist, wenn die Welle im Bereich des Gebietes liegt, für das U berechnet wurde. So ergeben die Kurven

im europäischen Raum eine gute Beziehung, für Asien besteht jedoch kein deutlicher Zusammenhang, doch scheinen Wellenlänge und Amplitude auch stromabwärts bei zunehmender Geschwindigkeit zu wachsen.

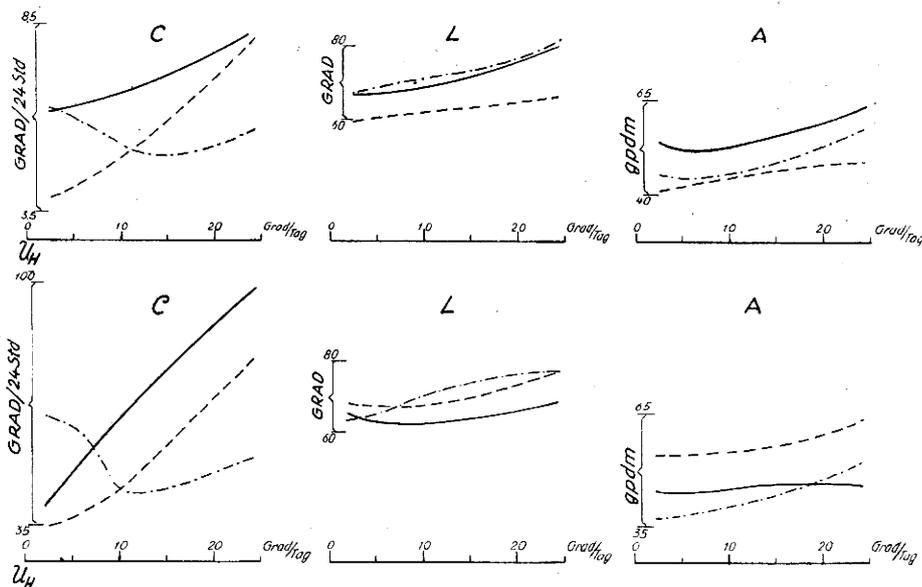


Abb. 8  
c, L und A als Funktion der Zonalgeschwindigkeit U 180  
für Amerika, Europa und Asien.  
Oben: Trog, unten: Rücken.  
— Amerika, - - - Europa, - · - - Asien.

Abbildung 8 zeigt dieselbe Untersuchung für U<sub>H</sub>, der Zonalgeschwindigkeit des Halbkreises (120° W bis 60° E = 180°). Es gilt:  $U_H = \frac{5 U_E + 4 U_A}{9}$ , wobei

U<sub>A</sub> (U<sub>E</sub>) die Zonalgeschwindigkeit über Amerika (Europa) bedeutet.

Die beiden Räume Amerika und Europa liefern für c als Funktion von U<sub>H</sub> gute Ergebnisse, nicht aber Asien; hier könnte man sogar auf eine Abnahme von c mit wachsendem U<sub>H</sub> schließen. Dies entspricht aber in keiner Weise den bisherigen Korrelationen. Es läßt sich daher der Schluß ziehen, daß

die Wahl des zugehörigen Sektors der Zonalgeschwindigkeit von großer Wichtigkeit ist. Am besten eignet sich ein Sektor von etwa 90°, der in unmittelbarer Nähe des Druckgebildes liegt.

Der Zusammenhang zwischen Zonalgeschwindigkeit und Wellenlänge sowie Amplitude nach Osten hin stellt keinen Widerspruch gegen das Fehlen eines solchen für c dar. Bei zunehmender Zonalgeschwindigkeit nehmen Wellenlänge und Amplitude zu. Die Ursache liegt vermutlich in der geringen Häufigkeit der Ausbildung kleiner Wellen, was Wellenlänge und Amplitude auch im angrenzenden Gebiet noch beeinflussen kann.

Tab. 14  
Mehrfachkorrelationstabelle für c und L als Funktion von A und S

S	Trog						Rücken					
	22	35	45	55	65	78	22	35	45	55	65	78
A												
10	8	8	7	8	5	2	6	10	8	7	7	7
30	11	8	8	6	6	5	7	9	8	6	5	4
50	9	8	7	5	5	4	7	7	6	5	5	4
70	9	6	6	5	4	5	5	6	4	4	4	4
90	8	7	5	4	4	6	4	5	3	4	4	-1
110	8	5	4	3	1		6	6	5	3	1	
10	50	41	39	37	43	48	56	45	38	39	43	50
30	57	53	53	55	55	61	65	59	54	52	51	56
50	76	67	67	66	71	75	84	75	68	65	66	65
70	82	81	85	76	82	91	99	87	81	77	83	83
90	88	101	87	94	94	95	122	104	98	89	94	119
110	105	102	100	109	106		127	116	109	99	106	

b) **Mehrfachkorrelationen**

Die Auswertung von Mehrfachkorrelationen ergab keine neuen Gesichtspunkte. Als Beispiel dafür sei Tabelle 14 mit den Eingängen A und S gezeigt. Man liest daraus eine Bestätigung der Einfachkorrelationen. Wie man der Tabelle entnimmt, sind bei gleicher Amplitude die kleinsten Wellen symmetrisch. Darin drückt sich aus, daß symmetrische (bzw. leicht östlich-schiefe) Wellen die größte Amplitude haben. Auch der gegensätzliche Verlauf der Beziehung zwischen L und S bei Trog und Rücken läßt sich aus der Tabelle erkennen.

c) **Trog- und Rückenform für extreme Verlagerungsgeschwindigkeit**

Zum Abschluß soll noch die Form von Trog und Rücken aufgezeichnet werden, bei welcher die Extremwerte der Geschwindigkeit auftreten (Abb. 9). Wir finden bei westlicher Schiefe von 25—30% die höchste, bei östlicher Schiefe von 85% die geringste Geschwindigkeit.

Nach einer Diskussion mit Prof. Dr. Seilkopf dürfte es sich bei der hier mit östlicher Schiefe angegebenen Trogform vorwiegend um die von ihm definierte Kaltfrontalzone, bei der Form mit west-

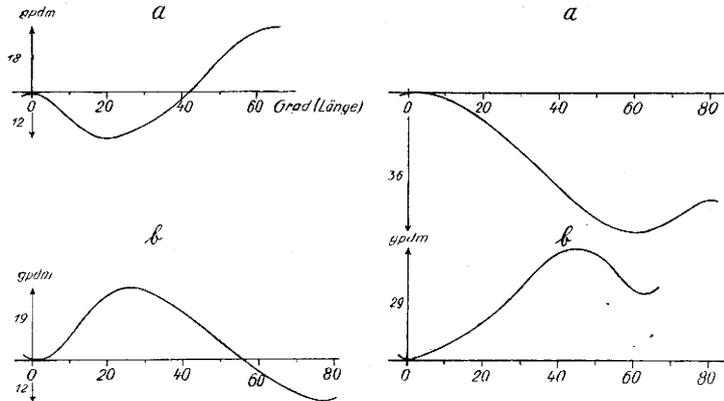


Abb. 9  
Mittlere Trog- und Rückenform, für welche extreme Geschwindigkeiten auftreten.  
Links: Maximale Geschwindigkeit, rechts: minimale Geschwindigkeit (Blockierung).

licher Schiefe vorwiegend um die Warmfrontalzone handeln (vgl. 24).

der Rossby-Formel im Sinne der aufgezeigten Korrelationen angebracht werden müssen.

d) **Korrelation L, A und S als Funktion von (U-c)**

Abbildung 10 gibt den Zusammenhang zwischen L, A und S als Funktion von (U - c) bei den Trögen wieder. Im Vergleich dazu wurde die nach Rossby errechnete Kurve für L eingezeichnet. Die Kurve für die Beobachtungswerte verläuft weit flacher. Auch ergeben sich aus Rossby's Formel für negative Werte von (U - c) keine reellen Lösungen; in unserem Beobachtungsmaterial finden wir jedoch in

e) **Abweichungen der Verlagerungsgeschwindigkeit von theoretischen Formeln**

Tab. 15

Abweichung der beob. Verlagerungsgeschwindigkeit von der nach der Rossby-Formel berechneten. (Tröge, Europamaterial, Frühling).

$\Delta$ Grad/Tag	A gpd/m	S %	n
26	50	54	40
16	54	50	54
10	50	48	82
5	48	46	97
-1	42	46	67
-9	38	42	31

$\Delta = c_R - c_B$   
 $c_R =$  berechnet  
 $c_B =$  beobachtet

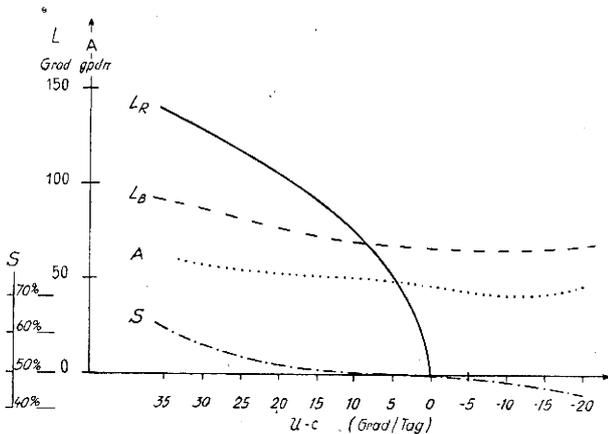


Abb. 10  
Vergleich von beobachteter und nach Rossby-Formel berechneter Wellenlänge.  
LR: berechnet, LB: beobachtet, A: Amplitude, S: Schiefe.

rund 20% aller Fälle  $U < c$ . Der Vergleich der Abweichungen der mittleren Beobachtungskurve von der theoretischen mit dem eingezeichneten Kurvenverlauf von A und S erweist, daß die Korrekturen

Um eine Überprüfung auch an Einzelwerten vorzunehmen, wurde für das Europamaterial im Frühling die Differenz zwischen dem beobachteten und dem nach Rossby berechneten Geschwindigkeitswert gebildet und A und S als Funktion dieser Abweichung dargestellt (Tab. 15). Bei positiver Abweichung ist die Verlagerungsgeschwindigkeit, die sich aus  $U_E$  und L berechnet, größer als die beobachtete, bei negativer Abweichung kleiner. Dies ist aber gerade die Korrektur, die nach den Beziehungen zwischen c und A oder S gefordert wird. Hohe Amplitude und östliche Schiefe verzögern die Geschwindigkeit, also ist die beobachtete Geschwindigkeit ge-

ringer als die nach der Rossby-Formel errechnete. Kleine Amplitude sowie westliche Schiefe beschleunigen die Verlagerung, die Differenz wird also negativ. So gibt Tabelle 15 nochmals eine Bestätigung, daß tatsächlich der Einfluß von Amplitude und Schiefe die Korrektur der Rossby-Formel in dem erwähnten Sinne bewirkt.

Außerdem wurde der Versuch unternommen, die Formel von Sutcliffe (26) anzuwenden. Danach hätte sich ein Ast barokliner Wellen und zwei Äste mit baroklinen stabilen Wellen ergeben müssen. Dieses Resultat kann aus dem hier vorliegenden Material, in dem die stabilen Formen geringer Amplituden bzw. Lebensdauer unter 1 Tag fehlen, nicht bestätigt werden, da über 90% der Punkte um den instabilen Ast streuen, was auch in Übereinstimmung mit Untersuchungen von Eady (7) steht. Aus den wenigen anderen Punkten, die stabilen Wellen entsprechen könnten, läßt sich kein Schluß für eine Aufgabelung ziehen, wie sie nach der Formel von Sutcliffe gefordert wird.

#### IV. Untersuchung über den Blockierungs-Effekt

##### a) Häufigkeit des Westwindmaximums für ausgewählte Längenschnitte

Dieser Abschnitt bringt die Ergebnisse einer Studie über den Blocking-Effekt und, soweit sie damit zusammenhängen, der troposphärischen Windmaxima (jet-stream). Für 0°, 30° und 80° W wurde entlang des Meridians die geographische Breite aller Wind-

maxima in 500 mb für 3 Jahre (1950—52) im Sommer (Juli—August) und Winter (Januar—Februar) bestimmt. Wie die Häufigkeitsdarstellung (Abb. 11) ergibt, lassen sich 3 bevorzugte Breiten aus den Häufigkeitsgipfeln ablesen. Für alle 3 Meridiane zeigt sich im Sommer und Winter in rund 50° Breite ein Maximum der Häufigkeit. Über Amerika (80° W) liegt es in niedrigerer Breite als an der Westküste Europas (0°-Länge). Über dem Atlantik (30° W) haben wir im Sommer Übereinstimmung mit Amerika, im Winter dagegen mit Europa. Im allgemeinen ist die Häufigkeit des Auftretens in 50° Breite im Winter geringer als im Sommer. Während dieses Häufigkeitsmaximum bei allen 3 Längengraden im wesentlichen übereinstimmt, treten bei 35° Breite bemerkenswerte Unterschiede auf. Augenfällig ist das schmale Maximum dafür längs 0° im Sommer. Die Häufigkeit übertrifft die von 50° fast um das Doppelte, das Windmaximum ist also weit beständiger.

Die geographische Breite entspricht dem Nordrand Afrikas, der Gipfel ist daher erklärbar aus dem Gegensatz der heißen Festlandluft über Afrika und der kühleren Meeresluft über dem Mittelmeer. Da dieser über dem Atlantik im Bereich des Azorenhochs nicht besteht, verwundert es nicht, wenn wir für 30° W keine Häufung feststellen. Über Amerika ist der Gipfel nur im Winter deutlich ausgeprägt (Gegensatz zwischen Kaltluft über dem Kontinent und der Warmluft im Golf von Mexiko). Über die Bedeutung dieser Befunde für die allgemeine Zirkulation, besonders das Verhältnis von Passatzirkulation und Düsenströmung, vergleiche (10).

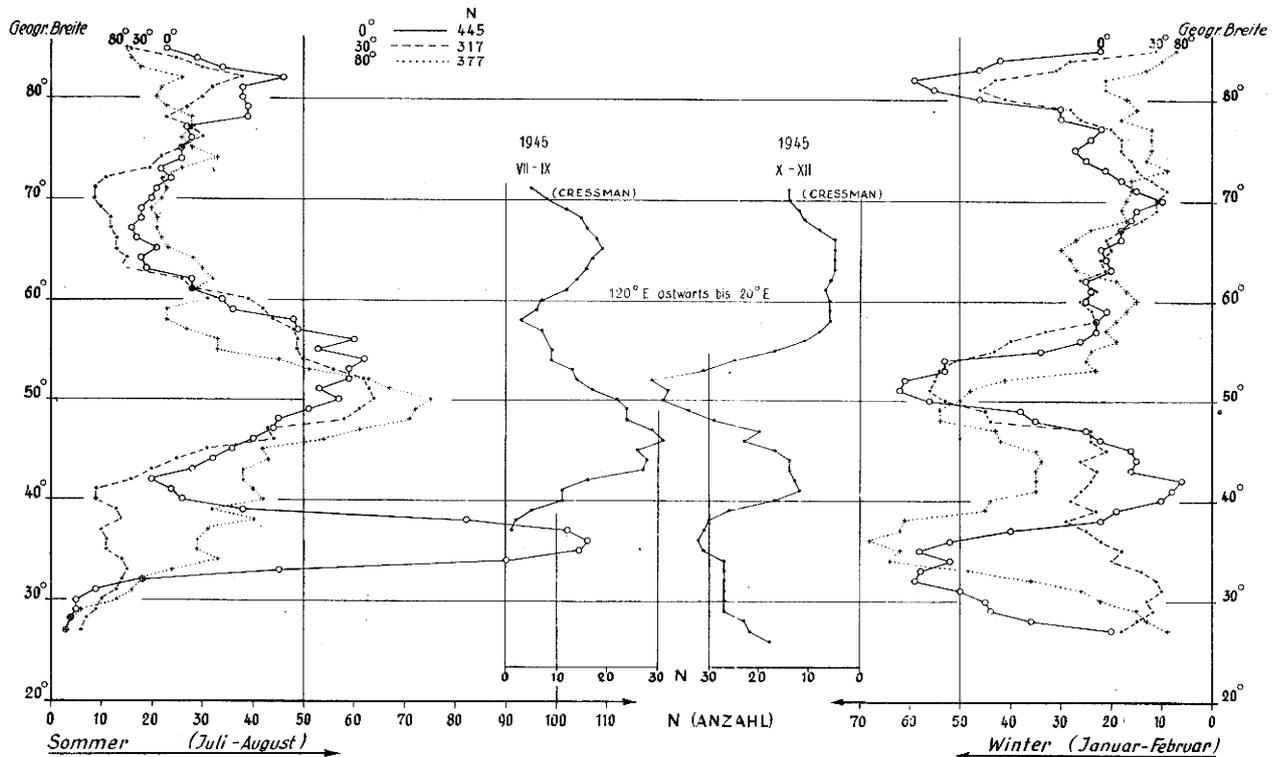


Abb. 11  
Häufigkeit des Windmaximums entlang 0°, 30° und 80°W-Länge  
für Sommer (VII—VIII) und Winter (I—II) für 1950—1952.

Ein geringes Maximum zeigt sich im Sommer im hohen Norden, das besonders im Winter deutlich hervortritt, über Amerika jedoch fast völlig in beiden Jahreszeiten fehlt (Kältepol über Nordkanada). In die Abbildung sind noch die Häufigkeitskurven aufgenommen, die Cressman (6) auf Grund einer Untersuchung der 300 mb Fläche für ein Gebiet von

120° E ostwärts bis 20° E, d. h. für insgesamt 260 Längengrade für Juli — September 1945 bzw. Oktober — Dezember 1945 bekommt. Wenn man bedenkt, daß es sich bei Cressman um Mittelwerte des Windmaximums fast um den gesamten Breitenkreis handelt, so ist die Übereinstimmung recht gut. Die räumlichen Unterschiede, die auf der hier

durchgeführten Auszählung für 3 Meridiane zutage treten, können natürlich aus diesem Mittel für den Breitenkreis nicht abgelesen werden. Auch zeigt die Sommerkurve für 300 mb im allgemeinen eine Verschiebung des Häufigkeitsgipfels nach Süden. Inwieweit dies auf die Verwendung der 300 mb Fläche, die Mittelung in zonaler Richtung oder die Daten von 1945 zurückgeht, kann hier nicht geprüft werden.

Wie die Untersuchung für die 3 Meridiane jedoch zeigt, tritt jedenfalls in der Breite von rund 50° über weite Gebiete und einem großen Teil der Jahreszeiten häufig ein Windmaximum auf und so sind die Werte der Zonalgeschwindigkeit für 55° Breite, welche bei der hier durchgeführten Untersuchung verwendet werden, größtenteils repräsentativ.

Tab. 16

**Häufigkeit des Auftretens eines ein- und mehrfachen Westwindmaximums für 3 Meridianschnitte (500 mb, 1950—1952)**

	Sommer	Winter	
80° W	22 %	19 %	drei Windmaxima
30° W	11 %	17 %	
0° W	45 %	30 %	
80° W	79 %	73 %	mindestens zwei Maxima
30° W	60 %	68 %	
0° W	93 %	84 %	
80° W	21 %	27 %	einfaches Windmaxima
30° W	40 %	32 %	
0° W	7 %	16 %	

Tabelle 16 enthält eine Zusammenstellung über das Auftreten eines oder mehrerer Windmaxima längs eines Meridians. Danach haben wir für Europa (0°) fast immer zwei Maxima, in der Hälfte davon sogar drei. Im Winter ist das Auftreten zwar etwas geringer, aber immer noch sehr häufig. Auch über Amerika haben wir noch recht oft ein doppeltes Maximum, jedoch nur in ¼ davon ein dreifaches. Meist fehlt es im Norden. Naturgemäß ist über dem Atlantik in 30° W das Auftreten eines einfachen Windmaximums häufig, doch auch hier haben wir noch in mehr als der Hälfte zwei Gipfel.

**b) Zeitlicher Ablauf des Blockierungs-Effekts für verschiedene Parameter**

Da es sich erwiesen hat, daß in einer großen Zahl von Fällen mehrere Windmaxima bestehen, wurde hier auch für die Blockingfälle nicht die Definition verwendet, wie sie Rex (22) gibt. Hier wurde als Blockierung bezeichnet, wenn ein Trog oder Rücken mindestens 3 Tage stationär war (Summe c bis ± 3) oder rückwärts wandert (Summe c < -3)\*. Während Rex gewissermaßen nur die Blockierungen erfaßt, die für eine Langfristprognose von Bedeutung sind, werden bei der hier gegebenen Definition diejenigen ausgewählt, die für eine Mittelfristprognose in Frage kommen. Aus dem Material lassen sich rund je 150 Beispiele bilden. Für diese wurde der zeitliche Ablauf von c, L, A und S für 3 Tage vorher und nachher untersucht (Abb. 12). Wellenlänge und Amplitude steigen zum Stichtag hin an, die Schiefe nimmt plötzlich ab. Dieser Umschwung kommt durch die Blockierung. Es treten aber die Änderungen alle um den Stichtag ein, vor-

\*) Auch Brezowsky, Flohn und Heß (3) verwenden eine andere Definition als Rex.

her zeigen sich noch keine Anhaltspunkte. Hieraus läßt sich leider kein eindeutiges Argument für eine Mittelfristprognose ableiten.

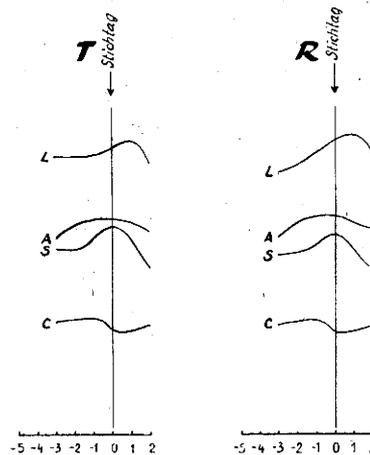


Abb. 12  
Zeitlicher Verlauf von c, L, A u. S für den Fall der Blockierung, Links: Trog, rechts: Rücken

Eine Trennung des Materials in 3 Gruppen, eine stationäre, eine rückläufige, deren mittlere Geschwindigkeit 2 Tage vorher mehr als 7,5°/Tag und eine rückläufige, deren mittlere Geschwindigkeit 2 Tage vorher weniger als 7,5°/Tag betrug, führte zum selben Ergebnis. Wellenlänge und Amplitude steigen zwar an, doch läßt sich aus diesen leicht aus der Wetterkarte zu entnehmenden Parametern kein Argument gewinnen, das schon frühzeitig auf die Entwicklung einer Blockierung hinweist.

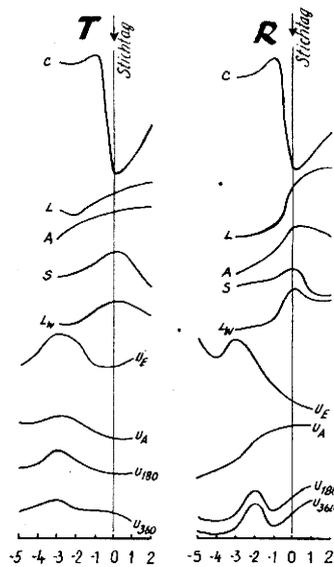


Abb. 13  
Zeitlicher Verlauf mehrerer Parameter für den Fall der Blockierung in Europa, Links: Trog, rechts: Rücken

Um Aufschluß über den Ablauf der Zonalgeschwindigkeit zu gewinnen, wurde das besonders interessierende Material von Europa herausgegriffen. So bleiben rund je 50 Fälle übrig. Abbildung 13 ergibt für c, L, A und S den vom letzten Bild bekannten Verlauf. U<sub>E</sub> zeigt etwa 3 Tage vorher einen langsamen Abfall, ebenfalls U<sub>H</sub>, in dem sich der Verlauf von U<sub>E</sub> spiegelt. U<sub>A</sub> dagegen und U<sub>360</sub> weisen keine Beziehung auf.

Ähnlich ist das Ergebnis für die Rücken. Hieraus folgt aber ein bedeutsamer Schluß. Die bisherige Vorstellung des Wetterdienstpraktikers ging meist davon aus, daß die Zonalgeschwindigkeit auf einen bestimmten Schwellenwert anwächst, wobei die verstärkte Westdrift den Austausch in nord-südlicher Richtung beschränkt. Daraufhin stellt sich eine Meridionalströmung ein, die zur Blockierung führt und den Austausch wieder in Gang bringt. Wäre dies der Fall, so müßten zum einen die Werte  $U_H$  und  $U_E$  weit über dem Mittelwert liegen und zum andern der Abfall erst am Tage selbst bzw. einen Tag vorher eintreten. Nach den hier vorliegenden Ergebnissen ist dies jedoch nicht der Fall, so daß diese Vorstellung nicht aufrechterhalten werden kann.

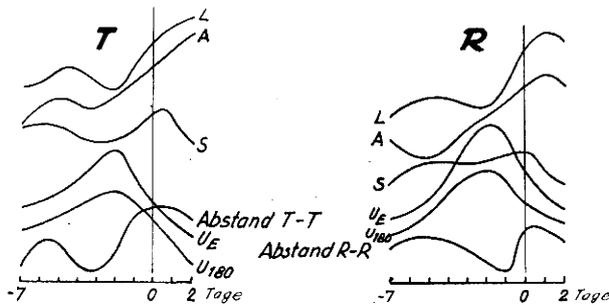


Abb. 14  
Zeitlicher Verlauf mehrerer Parameter für Blockierung mit über 3 Tagen Dauer.  
Links: Trog, rechts: Rücken

Um weitere prognostische Möglichkeiten zu erörtern, wurden die großen Blockierungsfälle herausgegriffen, bei denen die Wellen mindestens 4 Tage stationär bzw. rückläufig werden und der Ablauf

verschiedener Größen 7 Tage vor bis 2 Tage nach dem Beginn der Blockierung untersucht (Abb. 14). Für Wellenlänge, Amplitude und Schiefe resultiert wieder das bekannte Bild. Auffällig ist eine plötzliche Zunahme, beginnend 2 Tage vor dem Stichtag. Diese Erscheinung bedeutet eine Erweiterung des gesamten Systems, in welcher das blockierende Druckgebilde eingebettet ist. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, daß sich im Westen ein neuer Trog bzw. Rücken bildet. Er setzt im Westen des bisherigen Gebildes an, womit besonders der Sprung in der Wellenlänge  $L_W$  und auch in der Amplitude erklärt werden kann. Verfolgt man den Verlauf des Abstandes zwischen zwei Trögen bzw. zwei Rücken, so tritt auch hier diese sprunghafte Erweiterung in Erscheinung, so daß man auf Neubildung bei den nachfolgenden Druckgebilden schließen könnte.  $U_E$  zeigt einen gewissen Abfall schon 2 Tage vorher; eine Abnahme der Zonalgeschwindigkeit ist offenbar notwendig, spielt jedoch nicht die überragende Rolle wie bisher angenommen. Die Vorstellung des Überschreitens eines Schwellenwertes kann auf Grund dieser Ergebnisse nicht gestützt werden.

Brezowsky (2) hat in einer Arbeit über blockierende Rücken darauf hingewiesen, daß sowohl im vorlaufenden Trog wie im nachfolgenden Kälteausbrüche notwendig sind, um ein Blockieren zu erreichen. Um dies zu prüfen und vor allem auch für den Trog Anhaltspunkte für eine Prognose des Blockierens aufzusuchen, wurde der Verlauf der relativen Topographie 500/1000 mb jeweils für den Trog bzw. Rücken selbst, den vorlaufenden und den beiden nachfolgenden Druckgebilden aufgezeichnet. Der Ablauf wurde jeweils für 4 Breitengrade (70°, 55°, 45° und 35°), verfolgt. Wie auf Abbildung 15 dargestellt, beginnt etwa 4 Tage vorher beim blockierenden Rücken selbst ein Warmluftvorstoß, während man im nachfolgenden Trog einen Kälteausbruch, der etwas früher stattfindet, gut verfolgen

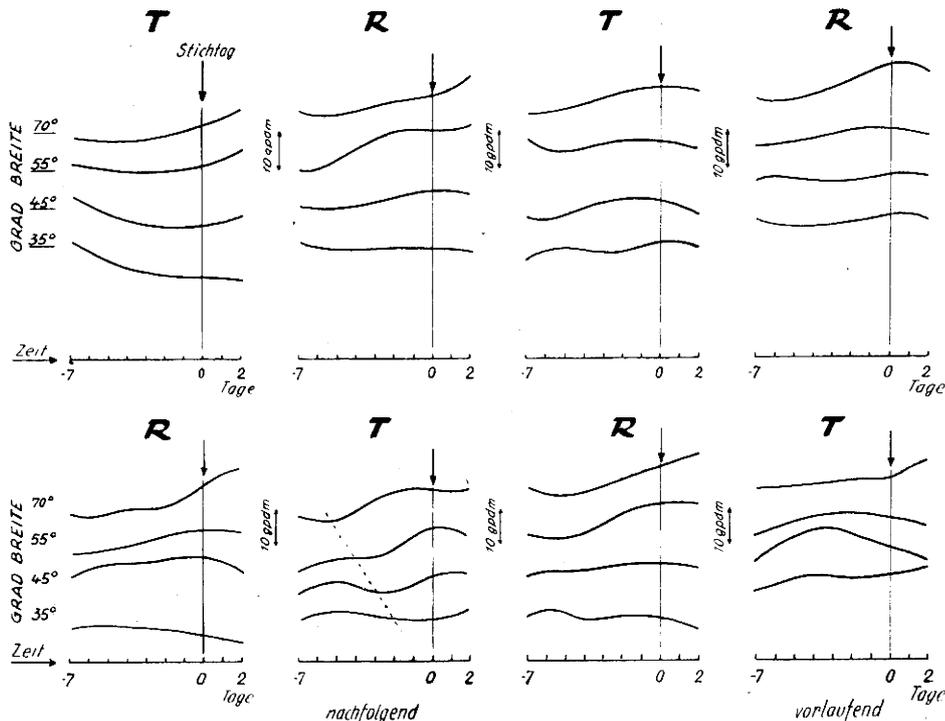


Abb. 15  
Verlauf der relativen Topographie 500/1000 mb für Blockierung über 3 Tagen Dauer.  
T: Trog, R: Rücken.

kann. Beide benachbarten Tröge unterliegen der Erwärmung, so daß ein breiter Warmluftvorstoß nach N in Gang kommt.

Vielleicht löst der vorhergehende Kaltluftvorstoß diesen aus und führt so zur Blockierung. Auch der Kaltluftausbruch im vorlaufenden Trog findet sich, wenn auch nur in mittleren Breiten und für die letzten Tage. Man gewinnt den Eindruck, daß ein Kaltluftausbruch im nachfolgenden Trog einen Warmluftvorstoß im Rücken selbst auslöst, der nun seinerseits im vorlaufenden Trog wieder einen Kältevorstoß bedingt; diese Auslösung ist dem Synoptiker wohlbekannt.

Bei den Trögen ergibt sich kein eindeutiges Bild. Ob man die Warmluftvorstöße in den beiden anschließenden Rücken mit dem Blocking-Effekt in Zusammenhang bringen kann, läßt sich jedenfalls schwer sagen.

c) Vergleich des Verlaufs der Zonalgeschwindigkeit in verschiedenen Breiten

Bisher wurde für die Zonalgeschwindigkeit immer nur ein Wert für 55° Breite verwendet. Um zu sehen, wie sie sich in anderen Breiten verhält, wurde für die Blockierungsfälle der Abbildung 14 die Zonalgeschwindigkeit aus dem Luftdruckgefälle von 10° Breite für 45° und 35° für Europa (40° W bis 60° E) berechnet. Abbildung 16 zeigt den zeitlichen Ablauf dieser drei Werte der Zonalgeschwindigkeit (auf gleichen Maßstab reduziert). Die Zonalgeschwindigkeit ist in 45° geringer als in beiden anderen Breiten, d. h. über Europa findet sich meist — wie im Abschnitt IVa — ein doppeltes Windmaximum. Dies tritt auch bei den von Rex untersuchten Fällen auf. Weiter ergibt sich, daß einige Tage vor sowie nach der Blockierung die Zonalgeschwindigkeit in 35° Breite größer ist, dagegen in den letzten 3—4 Tagen vor der Blockierung in 55 Breite kleiner. So springt im Blockierungsgebiet das Maximum der Westdrift 3—4 Tage vorher von rund 35° auf rund 55°, um nach Eintritt der Blockierung in niedrigere Breiten zurückzuwandern. Damit ist ein Hinweis auf das Verhalten der Düsenströmungen (jetstream) bei der Blockierung gegeben, das weitere Untersuchung lohnt.

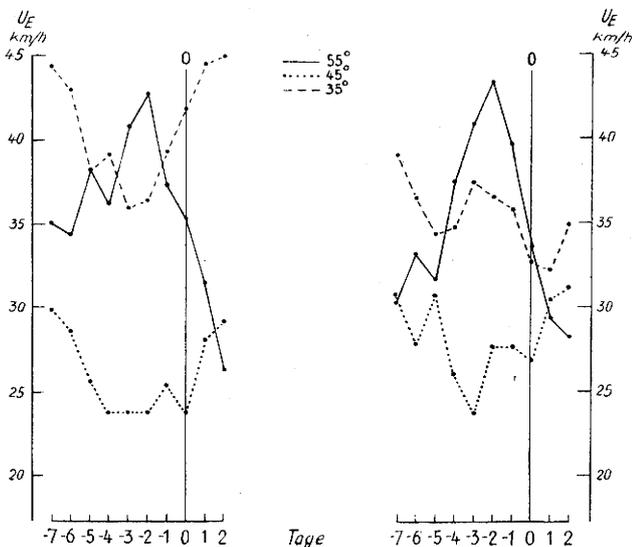


Abb. 16

Vergleich der Zonalgeschwindigkeit für 55°, 45° und 35° Breite für den Fall der Blockierung in Europa. Links: Trög, rechts: Rücken

V. Schlußbemerkungen

a) Zusammenstellung der Hauptergebnisse

1) Die Häufigkeitsgipfel der Verteilung der Tröge und Rücken (der 500-mb-Fläche) längs des 55. Breitengrades fallen mit der Lage der quasistationären Wellen zusammen. Die quasistationären Tröge entstehen durch häufiges Durchziehen von Trögen über diesen Gebieten, die quasistationären Rücken werden jedoch durch häufiges Auftreten stationärer Gebilde zuwege gebracht. Wellen mit kleiner Amplitude und Länge treten über diesen Gebieten auch nicht häufiger als über den anderen auf.

Die Häufigkeitsverteilung der Blockierung (für rund 3 Tage Andauer) weist auf den Einfluß der Orographie hin.

2) Wellenlänge, Amplitude und Zonalgeschwindigkeit besitzen einen jahreszeitlichen Gang, wobei letztere den beiden ersteren so entgegengerichtet ist, daß bei der Verlagerungsgeschwindigkeit, die dem Gang der Zonalgeschwindigkeit parallel läuft, eine Dämpfung eintritt.

Räumliche Unterschiede weist neben Wellenlänge und Amplitude besonders die Schiefe auf. Sie besitzt eine offensichtliche Abhängigkeit vom Untergrund und ist über dem Meere für die Tröge überwiegend westlich, über dem Lande dagegen östlich (Reibungseinfluß?).

3) Die Wellen bleiben im Sommer und Herbst länger erhalten als in den beiden anderen Jahreszeiten, jedoch dauern rund 50% aller Wellen nicht länger als 4 Tage. Der Aufbau des Troges (Kaltlufteinbruch) scheint rascher vor sich zu gehen als die Entwicklung der Rücken (Warmluftvorstoß). Während offenbar der Trog durch den nachfolgenden Rücken aufgefüllt wird, baut der Rücken in sich selbst ab.

4) Die Formel von Rossby für „lange Wellen“ muß erweitert werden, da auch Amplitude und Schiefe (Asymmetrie der Wellen) auf die Verlagerungsgeschwindigkeit einen Einfluß haben. Tröge und Rücken mit westlicher Asymmetrie wandern schnell, mit östlicher langsam, kleine Amplitude bewirkt Beschleunigung, hohe Verzögerung. Bei einer Wellenlänge von rund 100 Grad (etwa 6000 km) tritt offenbar bevorzugt eine Blockierung ein.

5) Die Blockierung ist ein Vorgang, bei dem mehrere Faktoren zusammenwirken. Neben einem Einfluß der Orographie beobachtet man eine Vergrößerung der Wellenlänge, hervorgerufen durch Neubildung von Wellen im Westen; wahrscheinlich ist auch die Abnahme der Zonalgeschwindigkeit notwendig sowie die Wanderung des Hauptwindmaximums nach mittleren Breiten. Auch Warmluftvorstöße und Kaltluftausbrüche sind bei der Blockierung beteiligt.

b) Folgerungen

Der größte Teil der durchgeführten Studien wurde auf Grund einer eindimensionalen Betrachtung längs 55° N gewonnen. Wie sich aber bereits im letzten Kapitel abzeichnet, ist zumindest eine zweidimensionale Ausdehnung notwendig, um weitere Fragen, besonders im Zusammenhang mit der Blockierung zu erklären. Auch hat sich in der vorliegenden Arbeit gezeigt, daß die Probleme der Mittelfristvorhersage nur durch mehrdimensionale Untersuchungen zu lösen sind, da die Wetterentwicklung von zu vielen Faktoren abhängig ist. So konnte auch keine Lösung gefunden werden, die mit ein-

fachen aus der Wetterkarte abzulesenden Parametern wie Wellenlänge, Amplitude oder Schiefe zu brauchbaren Mittelfristvorhersagen führen kann. Die vorliegende, rein empirisch statistisch ange-setzte Untersuchung wirft eine große Zahl Fragen auf, die auf recht komplizierte theoretische Probleme hinweisen. Auf ihre Lösung muß hier verzichtet werden, da diese auf einer ein- oder zwei-dimensionalen Basis offenbar nicht mehr möglich ist. Sie zeigt aber damit zugleich die Notwendigkeit einer voll dreidimensionalen Betrachtung an. Das Phänomen der „langen Wellen“ oder „Rossby-Wellen“ und ihre Blockierung gehört zu den Grundfragen der mittel- und längerfristigen Witterungsvorhersage (24, 25) und bedarf daher weiterer Forschungen, zu denen hier lediglich einige Bausteine geliefert werden sollten.

**Anmerkung:** Die Anregung zu diesem Thema, das im Rahmen der Forschungsabteilung des Deutschen Wetterdienstes der US-Zone bearbeitet wurde, gab Herr Prof. Dr. H. Flohn. Ihm dankt der Autor auch für die Diskussion der Ergebnisse.

#### Literatur

- 1) Berson, F. A.: On the factors controlling the instability of long waves in zonal currents. *Ark. f. Geofys.* **1**, 187 (1950).
- 2) Brezowsky, H.: Synoptische Methoden zur Vorhersage von Umsteuerungen im atlantischen-europäischen Raum. *Ann. Meteor.* **4**, 295 (1951).
- 3) Brezowsky, H., Flohn, H. and Heß P.: Some remarks on the climatology of blocking action. *Tellus* **3**, 191 (1951).
- 4) Charney, J.: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteor.* **4**, 135 (1947).
- 5) Cressmann, G. P.: On the forecasting of long waves in the upper westerlies. *J. Meteor.* **5**, 44 (1948).
- 6) Cressmann, G. P.: Variations in the structure of the upper westerlies. *J. Meteor.* **7**, 39 (1950).
- 7) Eady, E. T.: Long waves and cyclone waves. *Tellus* **1**, No. 3, 33 (1949).
- 8) Essenwanger, O.: Statistische Untersuchung über die Verlagerung von Höhentroggen und -rücken. *Ann. Meteor.* **5**, 328 (1952).
- 9) Essenwanger, O.: Neue Methode der Zerlegung von Häufigkeitsverteilungen in Gauß'sche Normalkurven und ihre Anwendung in der Meteorologie. (Manuskript).
- 10) Flohn, H.: Probleme der großräumigen Synoptik. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone*, Nr. 35, 12 (1952).
- 11) Flohn, H.: Zur Aerologie der Polargebiete, *Meteor. Rdsch.* **5**, 81 (1952).
- 12) Flohn, H.: Hochgebirge und allgemeine Zirkulation, *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim. A* **5**, 265 (1953).
- 13) Hollmann, G.: Entstehung stationärer Hochdruckgebiete dynamisch und thermodynamisch betrachtet. (Im Druck).
- 14) Hovmöller, E.: The trough- and ridge diagram. *Tellus* **1**, No. 2162 (1949).
- 15) Täglicher Wetterbericht. *Dt. Wetterd. US-Zone*, Bad Kissingen, Jg. 1949—1951.
- 16) Lönqvist, O.: The numerical prediction method for upper air profiles tried on some regular type profiles. *Tellus* **1**, No. 4, 53 (1949).
- 17) Namias, J.: Extended forecasting by mean circulation methods. *US. Weather Bureau*, Washington (1947).
- 18) Namias-Clapp: Studies of the motion and development of long waves in the westerlies, *J. Meteor.* **1**, 57 (1944).
- 19) Palmén, E.: The role of atmospheric disturbances in the general circulation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **77**, 337 (1951).
- 20) Petterssen, S.: Some aspects of the general circulation of the atmosphere. *Cent. Proc. Roy. Meteor. Soc.* 1950, 120.
- 21) Queney, P.: The atmospheric waves considered as associated with the vorticity discontinuities. *Tellus* **4**, 88 (1952).
- 22) Rex, F. D.: Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. I and II. *Tellus* **2**, 196, 275 (1950).
- 23) Rossby, C.: Relation between variations in the intensity of zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J. Marine Res.* **2**, 38 (1939).
- 24) Seilkopf, H.: Spezielle Großzirkulation und Witterung. *Ann. Meteor.* **1**, 312 (1948).
- 25) Starr, V. P.: An essay on the general circulation of the earth's atmosphere *J. Meteor.*, **5**, 39 (1948).
- 26) Sutcliffe, R. C.: The quasi-geostrophic advective wave in an baroclinic zonal current. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **77**, 226 (1951).
- 27) Walsh, J. E.: An empirical method for forecasting mean troughs. *U. S. Weather Bureau* (1943).
- 28) Walsh, J. E.: The dynamics of the long waves in the westerlies. *U. S. Weather Bureau* (1943).
- 29) Walsh, J. E.: A refinement of the wave length computations. *U. S. Weather Bureau* (1944).
- 30) Wexler, H.: Use of Rossby's trough formula on the mean 5-day 3-km pressure-charts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **23**, 32 (1942).

