

Über die Zirkulationen kalter und warmer Luft zwischen hohen und niedrigen Breiten

Von

Felix M. Exner

wirkl. Mitgl. d. Akad. d. Wiss.

(Mit 13 Textfiguren)

(Vorgelegt in der Sitzung am 8. März 1928)

- I. Beobachtungsmaterial.
- II. Karten der warmen und kalten Zonen.
- III. Häufigkeit der kalten und warmen Strömungen.
- IV. Verteilung der Häufigkeit kalter Strömungen auf der Nordhalbkugel.
- V. Einige theoretische Erörterungen der kalten und warmen Strömung.

In einer früheren Arbeit¹ habe ich den Versuch gemacht, aus der Einstrahlung der Sonne auf die Erde und der Ausstrahlung der Erde gegen den Weltraum die Größe der atmosphärischen Zirkulation zwischen Roßbreiten und Pol zu berechnen. Wegen der ablenkenden Kraft der Erdrotation kann nicht bloß eine einzige Zirkulation auf der Halbkugel der Erde bestehen, um die großen Wärmemengen der tropischen Gebiete zu den polaren Gebieten zu tragen. Die im äquatorialen Gebiet mögliche einfache Strömung der kalten Massen gegen den Äquator und der warmen darüber gegen Norden muß sich in höheren Breiten in mehrere Zirkulationen verteilen, die auf einem Breitenkreise nebeneinander liegen. Es kann also wegen der Erddrehung keine einfache Zirkulation quer zu einem Breitenkreis bestehen, man muß an einer Stelle desselben kalte Strömung aus dem Polargebiet, daneben warme aus dem Tropengebiet, neben letzterer wieder kalte Strömung usw. erwarten. Eine warme Strömung gegen Norden (auf unserer Hemisphäre) kann sich nur halten, wenn ein Druckgradient gegen Westen, eine kalte aus Norden, wenn ein Druckgradient gegen Osten besteht. Liegt somit z. B. eine kalte Strömung quer zu einem Breitenkreis westlich von einer warmen, so ist zwischen diesen beiden ein Tiefdruckgebiet, liegt eine kalte östlich der warmen, so ist zwischen ihnen ein Hochdruckgebiet notwendig. Es geben uns daher die Zahl der Hoch- und Tiefdrucke auf einem Breitenkreis die Zahl der nebeneinander liegenden Zirkulationen.

Aus der Größe des Wärmetransportes konnte ich die Geschwindigkeit der Strömungen berechnen und aus letzterer die Druckgradienten, welche auf einem Breitenkreis in der Richtung gegen

¹ Über die Zirkulation zwischen Roßbreiten und Pol; Meteorolog. Zeitschr. 1927, p. 46.

Osten und Westen nötig sind. Sie waren der Größenordnung nach mit den bekannten Druckgradienten in Übereinstimmung, die aus den nebeneinander liegenden Hoch- und Tiefdruckgebieten hervorgehen.

Die Zyklonen und Antizyklonen verändern sich von Tag zu Tag in ihrer Intensität und ihrer Lage. Daraus geht hervor, daß die Zirkulationen sich nicht in gleichmäßiger Weise erhalten, sondern fortwährend verlagern. Die Strömungen der kalten und warmen Luftmassen sind demnach auf einer Halbkugel durchaus nicht als konstant anzunehmen; wie sie sich verändern, ist weder erfahrungsgemäß noch theoretisch ermittelt worden. Im ganzen ist anzunehmen, daß solche Zirkulationen der Luft eine gewisse Ähnlichkeit mit jenen einer Flüssigkeit haben, z. B. des Wassers, weil in sehr großen Dimensionen die Gase durch Schwerkraftwirkung den Flüssigkeiten viel ähnlicher werden als in kleinen Dimensionen.

Wie ich schon in der früheren Arbeit hervorgehoben habe, dürfen wir diese Strömungen in der Atmosphäre nur als eine Wirkung der Sonnenenergie auffassen, welche Zirkulationen zwischen den kalten und warmen Gebieten verursacht, nicht als wellenartige Schwingungen an der Grenze eines warmen äquatorialen und eines kalten polaren Luftgebietes, wie dies die »Polarfront«-Theorie bezeichnet hat. In diesem Sinne sind dann die Zyklonen und Antizyklonen als Nebenwirkungen der Zirkulationen aufzufassen; sie erhalten ihre Energie aus der lebendigen Kraft einer Zirkulation, und diese lebendige Kraft stammt aus der Wärmezufuhr in niedrigen und der Wärmeentziehung in höheren Breiten.

Um die Zirkulationen zwischen niedrigen und hohen Breiten, d. h. die warmen und kalten Strömungen, näher kennen zu lernen, habe ich die Temperaturverhältnisse auf der nördlichen Halbkugel für eine Reihe von Tagen untersucht, ohne dabei auf die Druckverhältnisse der Halbkugel Rücksicht zu nehmen. Bekanntlich wird bei einer Strömung aus Süden die Luft immer etwas kälter, indem sie in kältere Gebiete der Erde eindringt. Um eine warme Strömung aus dem tropischen Gebiet festzustellen, ist es demnach nicht gut, die Absolutwerte der Temperatur eines Ortes zu verwenden, sondern es ist besser, die Abweichungen der Temperatur an einem Tag von der mittleren Temperatur des betreffenden Ortes zu benutzen. Auf diese Weise wurden für eine große Zahl von Orten der nördlichen Halbkugel die übernormalen oder unternormalen Temperaturen jedes Ortes für jeden Tag der drei Monate Jänner bis März 1910 ausgewertet und diese Werte mit positivem, beziehungsweise negativem Vorzeichen in eine Karte der nördlichen Halbkugel eingetragen. Hiedurch ergaben sich größere Gebiete als »warm«, andere als »kalt«, d. h. Abweichungen von der mittleren Temperatur nach oben und unten, die oft die Form von Streifen aus dem Süden gegen Norden hatten, also Zirkulationen nach der oben erwähnten Voraussetzung zeigten. Wenn es auch nicht möglich ist, alle diese 90 Karten hier zu veröffentlichen, so kann doch einiges

über die Ergebnisse dieser Untersuchung hier mitgeteilt werden. Für die künftigen Vorstellungen von den täglich wechselnden Erscheinungen der Luft scheint mir der lange übersehene Begriff von Warm- und Kaltströmungen als Wirkung der Wärmezufuhr von einiger Wichtigkeit.

Eine sichere Erkenntnis, wie sich diese Strömungen zueinander verhalten und umändern, kann erst nach sehr genauer Beobachtung gewonnen werden. Sind ja doch die viel einfacheren Strömungen eines Baches oder Flusses schon so verwickelt, daß wir sie nur selten voraussehen können.

I. Beobachtungsmaterial.

Zur Darstellung der Tageswerte kalter und warmer Zonen auf der Nordhalbkugel habe ich die Beobachtungen von 1910 gewählt, weil seither die russischen Jahrbücher nicht mehr erschienen sind. Das große russische Gebiet von Europa bis Ostasien spielt für diese Zwecke eine besondere Rolle. Von diesem Zeitraum konnte ich, der großen Arbeit wegen, nur drei Monate auswerten, und zwar wählte ich die Wintermonate Jänner bis März, weil die Strömungen im Winter intensiver sind als im Sommer.

Meist aus Jahrbüchern, mitunter auch aus Wetterberichten (z. B. für China), wurden die Tagestemperaturen von 120 Stationen ausgezogen, deren Lage in der folgenden Tabelle 1 angegeben ist.

Tabelle 1.

Verzeichnis der verwendeten Stationen.

Ort	Geographische		Ort	Geographische	
	Breite	Länge		Breite	Länge
> 70° Br.					
Alten..	70	23 ö.	Souvalki	54	23 ö.
Malye Karmakuly	74	53 ö.	Kursk..	52	36 ö.
			Saratow	51 ¹ / ₂	46 ö.
Üpernivik	73	56 w.	Viatka ..	58 ¹ / ₂	50 ö.
			Ekaterinburg ..	57	60 ¹ / ₂ ö.
70—60° Br.					
Bronnö ..	65 ¹ / ₂	12 ö.	Akmolinsk..	51	71 ¹ / ₂ ö.
Petersburg	60	30 ö.	Barnaul	53 ¹ / ₂	84 ö.
Archangelsk..	64 ¹ / ₂	40 ¹ / ₂ ö.	Kansk	56	96 ö.
Obdorsk	66 ¹ / ₂	66 ¹ / ₂ ö.	Kirensk	58	108 ö.
Surgut	61	73 ¹ / ₂ ö.	Troitskosavsk	50 ¹ / ₂	106 ¹ / ₂ ö.
Dudinka	69	87 ö.	Nertschinski Zavod	51	119 ¹ / ₂ ö.
Verkhoiansk	67 ¹ / ₂	133 ¹ / ₂ ö.	Nikolaewsk ..	53	141 ö.
Markowo a. A.	65	171 ö.	Petropawlowsk	53	159 ö.
Thorshaven	62	7 w.	Valencia..	52	10 w.
Stykkisholm	65	23 w.	Hebron	58	63 w.
Iviglut	61	48 w.	Moose Factory	51	81 w.
Dawson City	64	139 ¹ / ₂ w.	York Factory	57	92 w.
Nome	65	166 w.	Winnipeg	50	97 w.
			Edmonton	53 ¹ / ₂	113 ¹ / ₂ w.
60—50° Br.					
Kew	51 ¹ / ₂	0	Fort Vermilion	59	116 w.
Kopenhagen	56	12 ¹ / ₂	Sitka	57	136 w.
			Dutch Harbor	54	166 ¹ / ₂ w.

(Zu Tabelle 1.)

Ort	Geographische Breite	Länge	Ort	Geographische Breite	Länge
50—40° Br.			Jask	26	58 ö.
Besançon	47	6 ö.	Karachee	25	67 ö.
Wien	48	161 $\frac{1}{2}$ ö.	Neemuch	241 $\frac{1}{2}$	75 ö.
Scutari	42	191 $\frac{1}{2}$ ö.	Darjeeling	27	88 ö.
Czernowitz	48	26 ö.	Akyab	20	93 ö.
Noworossisk	45	38 ö.	Myitkyina	251 $\frac{1}{2}$	97 $\frac{1}{2}$ ö.
Aralskoe More	47	62 ö.	Hanoi	21	105 ö.
Andijan	41	721 $\frac{1}{2}$ ö.	Amoy	241 $\frac{1}{2}$	118 ö.
Changchun	44	1251 $\frac{1}{2}$ ö.	Naha	261 $\frac{1}{2}$	1281 $\frac{1}{2}$ ö.
Wladiwostok	43	132 ö.	Chichijima	27	142 ö.
Nemuro	43 $\frac{1}{2}$	145 $\frac{1}{2}$ ö.	Key West	241 $\frac{1}{2}$	82 w.
Bagnères de Bigorre	43	1 $\frac{1}{2}$ w.	Merida	21	891 $\frac{1}{2}$ w.
St. John's, Newfoundland	47 $\frac{1}{2}$	53 w.	Corpus Christi	28	971 $\frac{1}{2}$ w.
St. John's, Newbrunswick	45	66 w.	Honolulu	20	155 w.
Toronto	44	791 $\frac{1}{2}$ w.			
Chicago	42	87 $\frac{1}{2}$ w.	20—10° Br.		
Salt Lake City	41	112 w.	Sausane Mangu	101 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$ ö.
Victoria	48 $\frac{1}{2}$	123 $\frac{1}{2}$ w.	El Obeid	13	30 ö.
			Suakin	19	38 ö.
40—30° Br.			Aden	13	45 ö.
Algier	37	2 ö.	Mangalore	13	75 ö.
Cap Blanc	37	9 ö.	Cocanada	17	82 ö.
Malta	36	15 ö.	Port Blair	12	921 $\frac{1}{2}$ ö.
Athen	38	24 ö.	Mergui	121 $\frac{1}{2}$	981 $\frac{1}{2}$ ö.
Sidi Barani	32	26 ö.	Tourane	161 $\frac{1}{2}$	108 ö.
Beirut	34	351 $\frac{1}{2}$ ö.	Manila	15	121 ö.
Lenkoran	39	49 ö.	Bathurst	13	161 $\frac{1}{2}$ w.
Mesched	36	59 ö.	San Vicente	17	25 w.
Bairam Ali	38	62 ö.	Richmond Hill	12	62 w.
Muktesar	30	79 ö.	Santa Cruz	18	65 w.
Tschentou	30	1021 $\frac{1}{2}$ ö.	Mexico	191 $\frac{1}{2}$	99 w.
Shasi	30	112 ö.			
Tiensin	39	117 ö.	10—0° Br.		
Nagasaki	33	133 ö.	Lokoja	8	7 ö.
Tokio	35 $\frac{1}{2}$	140 ö.	Mongalla	6	32 ö.
			Colombo	7	80 ö.
Lissabon	39	9 w.	Labuan	5	115 ö.
Masagan	33	91 $\frac{1}{2}$ w.			
Funchal	32 $\frac{1}{2}$	17 w.	Cayenne	5	53 w.
Punta Delgada	38	26 w.			
Bermuda	32	66 w.	Atlantischer Ozean, nach Schiffsbeob- achtungen (Karten von Hoffmeyer)	55	20 w.
Hatteras	35	76 w.		45	20 w.
New Orleans	30	90 w.		40	40 w.
Oklahoma	36	97 $\frac{1}{2}$ w.		30	50 w.
El Paso	32	107 w.		20	40 w.
San Diego	33	117 w.		20	55 w.
San Francisco	38	123 w.		10	30 w.
30—20° Br.					
In Salah	27	11 $\frac{1}{2}$ ö.			
Assuan	24	33 ö.			
Bushir	29	51 ö.			

Die Temperaturwerte sind zum Teil die vom Morgen oder Nachmittag, zum Teil die des Tagesmittels, ausnahmsweise auch Maximal- oder Minimalwerte, wenn von einer Station sonst nichts angegeben war. Von einigen Stationen erhielt ich auch diese Daten im Manuskript, da sie nicht abgedruckt sind, so von Nome, Sitka, Dutch Harbor durch das Weather Bureau in Washington, von Bermuda (Prospekt), Moose Factory, York Factory und Fort Vermilion durch den Meteorological Service in Toronto, von Malye Karmakuly durch das Zentralobservatorium in Leningrad, wofür ich auch hier meinen besten Dank ausspreche. Die Daten von Scutari liegen im Manuskript an der Wiener Zentralanstalt für Meteorologie. Um die Temperaturen auf dem Atlantischen Ozean zu verwenden, benützte ich die in den Hoffmeyer'schen Karten eingetragenen Schiffsbeobachtungen und bezog sie, wenn es möglich war, auf die am Schluß der Tabelle 1 eingetragenen neun Punkte des Ozeans. Für das mittlere Gebiet des Stillen Ozeans war außer Honolulu leider keine Station zu finden. Doch reichen die Stationen südöstlich von Ostasien bis zu 140° ö. L. (Bonininseln); im nördlichen Teil ziehen sich die Stationen von Nordamerika bis ins Alaskagebiet, 166° w. L. (Dutch Harbor), auf der anderen Seite bis zu fast 160° ö. L. (Petro-pawlowsk), wodurch die Temperaturverteilung über dem Stillen Ozean von 70 bis 50° Br. angenähert feststellbar war.

Die Temperaturdaten der 90 Tage vom 1. Jänner bis 31. März wurden für jede Station graphisch aufgetragen, um die Abweichungen von einem normalen Wert des Tages zu erhalten. Es war meine Absicht, die täglichen Veränderungen darzustellen. Hiezu konnte ich nicht die Abweichungen von dem Monatsmittel verwenden, weil oft wochenlang in höheren Breiten die Temperatur abnorm hoch oder tief ist. Ich zog daher durch die zackigen Aufzeichnungen der 90 Tageswerte einer Station eine Kurve durch, und zwar keine geradlinige, sondern eine oft gekrümmte, sogar manchmal wellenförmige, welche die langandauernden Kälte- und Wärmezeiten darstellte. Diese Kurve gab sonach zunächst den jährlichen Temperaturgang innerhalb der drei Monate, weiter aber im Gebiet von Nordasien und Kanada auch langdauernde Temperaturschwankungen, die an mehreren Orten eine Welle von etwa vier bis acht Wochen Dauer darstellten. Diese Wellen wurden hier nicht weiter untersucht. Um nun die Abweichungen der einzelnen Tage von diesem durchschnittlichen Temperaturverlauf zu erhalten, wurden die Differenzen der wahren Werte jedes Tages von dem Wert dieses Tages in der angegebenen Kurve ausgezählt und diese positiven und negativen Abweichungen als Temperaturanomalien für die einzelnen 90 Tage jeder Station benützt.

Es ist kein Zweifel, daß diese Anomalien öfters, namentlich bei den Stationen in hohen Breiten auf Kontinenten, wo die Temperaturschwankungen sehr groß sind, um mehrere Grade unsicher sein können. In südlichen Breiten sind die Schwankungen gering, und daher sind dort die Mittelkurven sicherer. Da aber in hohen

Breiten die Abweichungen sehr groß sind, spielt eine Unsicherheit von einigen Graden keine bedeutende Rolle.

Dieses Material der Temperaturabweichungen wurde nun dazu verwendet, um für jeden Tag eine Temperaturkarte der nördlichen Halbkugel zu zeichnen. Da die Mittelwerte jedes Ortes ausgeschlossen wurden, so zeigen die Karten nur positive und negative Abweichungen der Temperatur, d. h. warme und kalte Zonen gegenüber den Mittelwerten.

II. Karten der warmen und kalten Zonen.

Auf den erwähnten Karten wurden Linien der Temperaturabweichungen Null eingezeichnet. Es sind fast immer große Gebiete der Halbkugel mit positiven, andere mit negativen Stationswerten besetzt, so daß es keine Schwierigkeit macht, durch die Nulllinien die warmen und kalten Zonen voneinander zu trennen. Außerdem wurden Linien eingetragen, die ein Gebiet über $\pm 5^\circ$ C., und weitere, die ein Gebiet über $\pm 10^\circ$ C. umgrenzten. Wegen des Fehlens der Stationen im Polgebiet war es nicht möglich, die Linien über das Polgebiet durchzuzeichnen. Auch war meistens die Zeichnung im südlichen Teil des Stillen Ozeans nicht genau. Sonst konnten die Linien über die Halbkugel recht sicher gezogen werden, wenn auch häufig kleine Fehler in der Lage der Nulllinien vorkommen mögen.

Als Beispiel gebe ich in den Figuren 1 bis 6 die sechs aufeinanderfolgenden Karten vom 16. bis 21. März 1910. Die dunklen, schraffierten Gebiete sind die kalten Zonen, getrennt durch die Nulllinien von den hellen, warmen Zonen. Im schraffierten Gebiet sind Linien mit -5° C. eingetragen, außerdem noch die vollständig geschwärzten Gebiete mit der Liniengrenze -10° C. Im hellen Gebiet sieht man Linien, innerhalb derer die Temperaturabweichung über 5° C. liegt, ferner Linien um ein mit Punkten versehenes Gebiet, das Abweichungen über $+10^\circ$ C. hat.

Da die Temperaturerniedrigung im allgemeinen durch Strömungen aus kalten Gegenden verursacht wird, so hat man die schraffierten Zonen als kalte Strömungen aufzufassen, die meist gegen südliche Breiten wandern; analog sind die hellen Zonen als warme Strömungen aus niederen Breiten anzusehen. Hier kommt es allerdings öfters vor, daß eine kalte Zone nicht in Verbindung mit dem polaren oder dem kalten Kontinentalgebiet steht, wie z. B. in der Karte vom 16. III. bei 90° ö. L. in Indien, wo eine abgeschlossene kalte Zone liegt. Man kann sonach nicht stets jede kalte Strömung in Verbindung mit hohen Breiten erwarten; bei näherer Durchsicht der Karten läßt sich erkennen, daß nicht selten eine kalte Strömung aus N von einer warmen Strömung aus S durchgeschnitten wird und sonach ein Rest kalter Masse einige Zeit lang in einem Gebiet noch ausharrt, bis die Temperatur dieser Masse erhöht wird. Solche Erscheinungen sind somit kein Widerspruch gegen die hier vertretene Anschauung, daß die kalten und

warmen Zonen auf den Karten Strömungen bedeuten. Eine direkte Untersuchung der Luftbewegungen mittels Windbeobachtungen ist hier nicht durchgeführt, doch zeigten mehrere Vergleiche der Temperaturkarten mit den Luftdruckkarten von Hoffmeyer, daß im Gebiet zwischen Nordamerika und Westasien die Isobaren, welche die normale Luftbewegung andeuten, mit den Verschiebungen der kalten und warmen Zonen von einem Tag zum anderen übereinstimmen.

Wie die hier reproduzierten Karten andeuten, sind die Gebiete mit $\pm 10^\circ$ meist unter höheren Breiten gelegen. Eine statistische Untersuchung dieser Verteilung folgt später. Auch sieht man, daß sich abnorm kalte und warme Strömungen oft sehr nahe nebeneinander finden. Weiter sei bemerkt, daß die beiden Strömungsarten im wesentlichen die Richtung der Meridiane haben, was der anfangs erwähnten Auffassung der Zirkulation entspricht. Im Polargebiet treffen sich fast immer mehrere meridional gelegene Strömungen von kalt und warm, man kann danach die polare Luft nicht als eine dauernd lagernde kalte Masse auffassen, welche sich von der warmen südlicheren Luft durch eine ruhende Polarfront trennt, sondern man muß annehmen, daß kalte Luft vom Polargebiet bis in das Tropengebiet strömt und warme in der umgekehrten Richtung bis ins Polargebiet. Es deuten also diese Karten meiner Ansicht nach ganz klar auf die mehrfachen Zirkulationen hin, die aus theoretischen Gründen unter verschiedenen Meridianen nebeneinander liegen sollen.

Sehr oft bemerkt man in den Karten, daß die warmen Strömungen die Richtung gegen Nordosten haben, nicht direkt gegen Norden. Auch wandern von einem Tag zum nächsten die Zonen größter Wärme oft ostwärts. Die kalten Zonen bewegen sich gleichfalls am häufigsten ostwärts, wobei sie außerdem naturgemäß die Bewegung gegen Süden haben; sie wandern oft den warmen Zonen nach, gegen Osten, kommen dabei aber südlicher zu liegen als jene, führen also mit den warmen eine Bewegung in zyklonaler Richtung aus. Mitunter tritt auch eine Bewegung der kalten Zonen gegen Südwesten auf. Diese Erscheinungen, die sich aus den Temperaturkarten ergeben, sind ganz in Übereinstimmung mit den Kenntnissen von den Zyklonen und Antizyklonen. Nur geht die Erscheinung der großen Länge kalter und warmer Zonen über die Verhältnisse an einzelnen Zyklonen und Antizyklonen hinaus; man hat zu erwarten, daß sich an der Grenze zweier wesentlich meridional gerichteter Strömungen zeitweise Zyklonen, beziehungsweise Antizyklonen ausbilden. In diesem Sinne kann man die Bjerknesche Anschauung der »Zyklonenfamilie«, wo mehrere Zyklonen sich hintereinander bilden, als den Effekt einer kalten Strömung im Westen und einer warmen im Osten auffassen, wie sie z. B. auf den Karten vom 16. bis 18. III. in Asien auftritt.

Die Fig. 1 vom 16. III. zeigt im Polargebiet drei warme und drei kalte Strömungen unter dem 70. und 60. Breitenkreise. Außerdem

16. III. 1910.

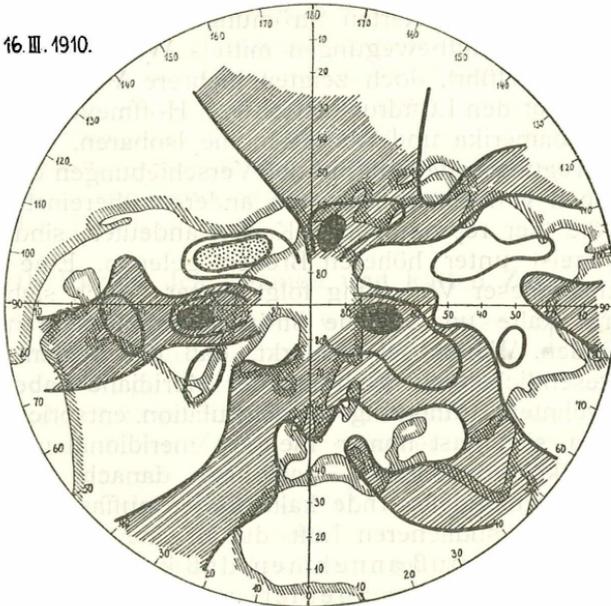


Fig. 1.

17. III. 1910.

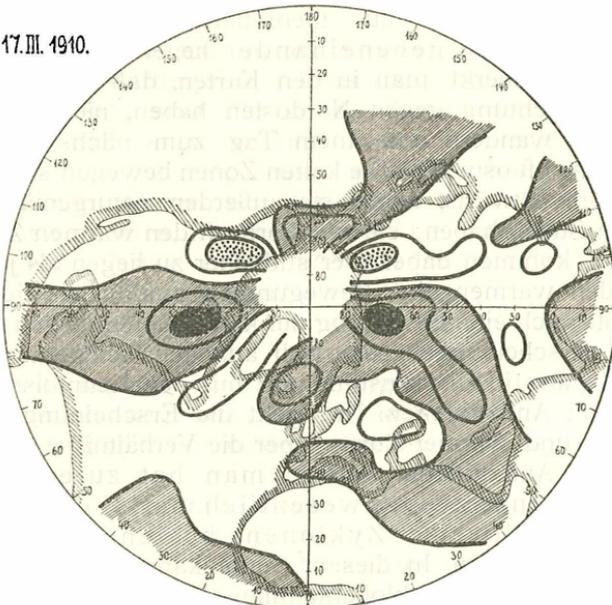


Fig. 2.

liegt in Europa eine warme Zone, die in die kalte Strömung aus Westasien und dem Eismeer nördlich von Europa hineindringt und sie in niedrigeren Breiten in zwei Teile teilt. Die warme Strömung über dem Westatlantik dringt bis zum 17. III. (Fig. 2) nach

18.III.1910.

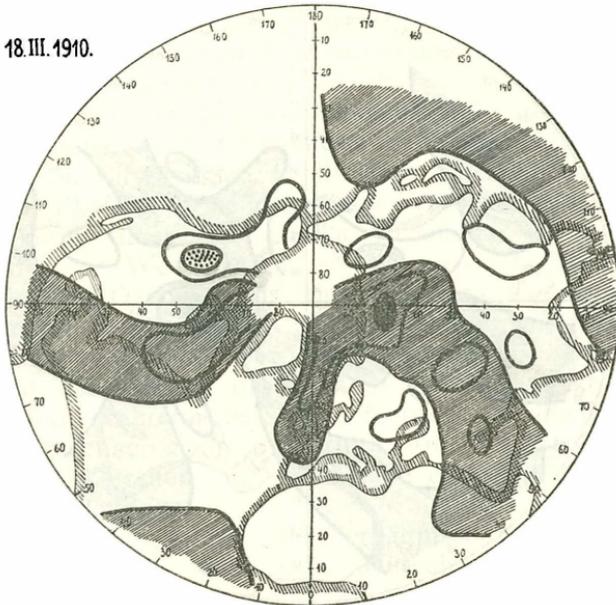


Fig. 3.

19.III.1910.

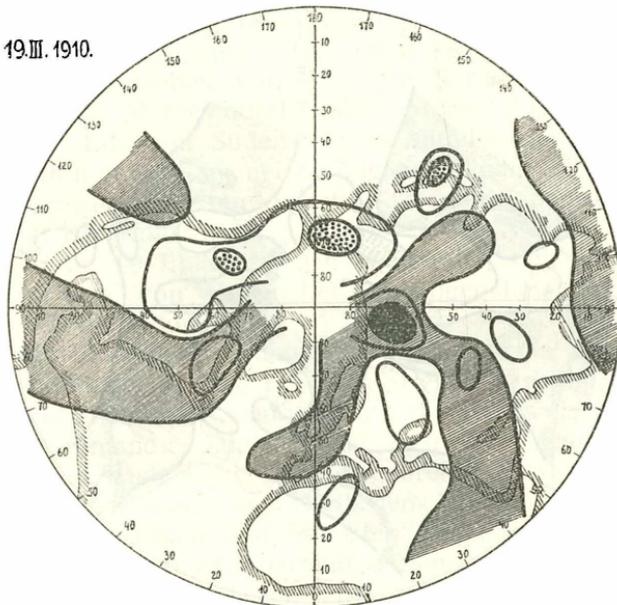


Fig. 4.

Europa durch, schneidet also die kalte Strömung im Ostatlantik ab und verstärkt die Wärme vom 16. III. über Südosteuropa. Zugleich wird die im Süden abgeschnittene Kaltströmung aus dem Gebiet von Island und Spitzbergen noch kälter. Andererseits dringt die Warmströmung

20.III.1910.

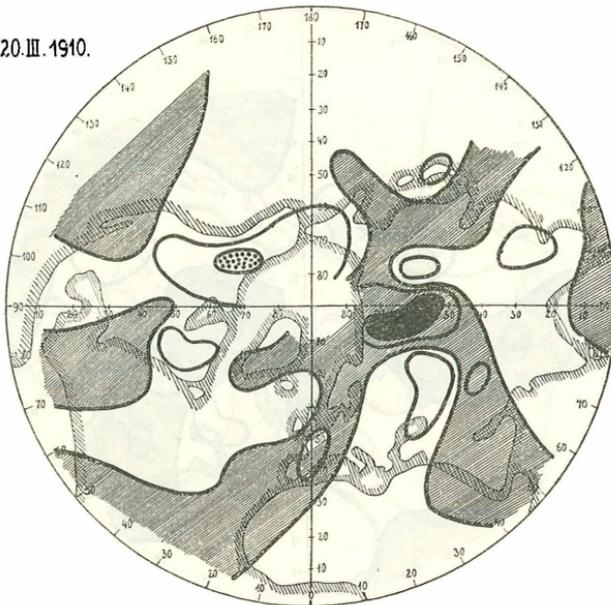


Fig. 5.

21.III.1910.

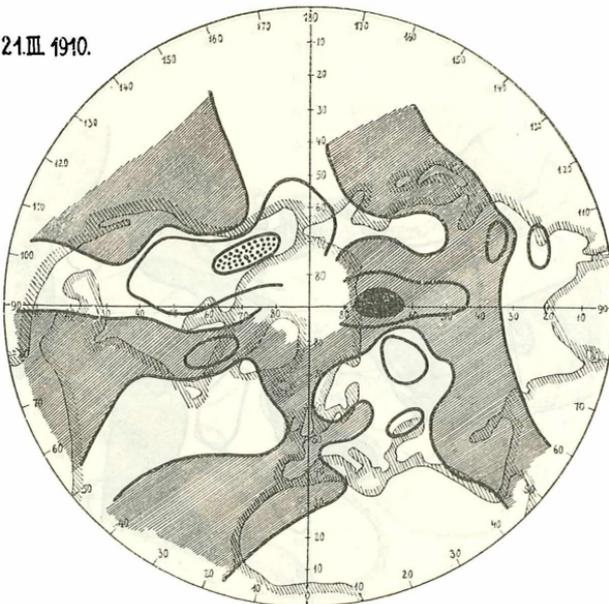


Fig. 6.

auf der Ostseite Nordamerikas weiter vor, in Upernivik in Nordwestgrönland beträgt die Anomalie am 17. III. $+9^{\circ}$. In ähnlicher Weise wird die Warmströmung in Ostasien im Norden viel intensiver, die Kaltströmung westlich von ihr dringt mit dem Betrag von -5°

aus 42° Breite am 16. III. bis unter 30° Breite am 17. III. vor. Im Gebiet von Japan scheint die Warmströmung vom 16. III. sich über den Pazifischen Ozean auszubreiten, und zwar auf der Südostseite der kalten Strömung im Kamtschatkagebiet; sie tritt in Verbindung mit der sehr intensiven Warmströmung im Westen Nordamerikas (die Station Dawson City hat am 16. III. eine Anomalie von $+20^{\circ}$).

Am 18. III. (Fig. 3) schneidet die Warmströmung in Ostasien die Kaltströmung über Kamtschatka vollständig ab und verbindet sich mit der von Westamerika, so daß nur mehr von 50° Br. an gegen Süden im Osten Asiens eine schwache Kaltzone liegt. Die Warmströmung aus dem Osten des Atlantik und aus Afrika fegt die nicht intensive kalte Zone über dem Mittelmeer bis zum 18. III. ganz hinweg und der Vorstoß der warmen Strömung setzt sich gegen Nordosten fort, während der Kälteeinbruch von dem Gebiet der Färöerinseln bis nach Spanien vorstößt. Am 18. III. sehen wir demnach in höheren Breiten nur zwei kalte und zwei warme Ströme, also zwei Zirkulationen.

Am 19. III. (Fig. 4) sind die Verhältnisse ziemlich ähnlich wie am Tag vorher, doch sieht man deutlich, daß sich sowohl die Warmströmung über Westamerika wie auch die Kaltströmung über Ostamerika und ebenso die östlich folgenden beiden Strömungen (warm im W, kalt im E des Atlantik) vom 18. bis 19. III. ostwärts verschoben haben. Auch dringt die Warmströmung über Rußland am 19. III. noch weiter gegen Osten vor, das Gebiet von $+5^{\circ}$ nähert sich deutlich dem Gebiet von -10° in Nordasien. Von letzterem strömt eine kalte Masse durch Asien gegen Südchina, wobei ein Gebiet warmer Luft von Süden her in Mittelsibirien zwischen den beiden Kaltströmungen erscheint. Zugleich findet sich eine neue intensive Warmströmung am 19. III. auf den japanischen Inseln. Die Intensität der Kaltströmung im Osten von Nordamerika nimmt vom 18. bis zum 19. III. im Norden ab. Ihr hat sich am 19. III. die Anomalie von $+5^{\circ}$ von Westen her sehr angenähert (Moose Factory hat am 19. III. die Anomalie $+9^{\circ}$, Chicago $+7^{\circ}$).

Am 20. III. (Fig. 5) schneidet diese warme Strömung die östlich liegende kalte in einem breiten Streifen ganz ab, die letztere findet sich nur mehr im Süden und auf der Nordseite gegen Osten verschoben (Grönland). Zugleich hat sich die Kaltströmung über Westeuropa ganz nach Südwesten ausgebreitet. Der vorhin erwähnte Vorstoß der Kaltströmung aus Nordasien hat sich bis zum 20. III. noch weiter gegen Osten und Südosten ausgebreitet. Die Ursache dieser Bewegung hängt offenbar mit der intensiven Warmströmung aus dem Süden von Mittelasien zusammen. Die Zone von $+5^{\circ}$ wandert aus dem Himalayagebiet bis zu 60° Br. (Kirensk $+7^{\circ}$), zieht also östlich des intensiv kalten Gebietes in Nordasien gegen Nordosten.

Am 20. III. haben wir in hohen Breiten nur eine Warmströmung und eine Kaltströmung, d. h. unter 70° Br. aus dem Gebiet von 140° ö. L. über Amerika bis zu 60° w. L. eine warme

Strömung gegen das Polgebiet, im übrigen Teil eine kalte wesentlich gegen Süden.

Am 21. III. (Fig. 6) hat sich die kalte Strömung aus dem Gebiet von Grönland neuerlich gegen Süden ausgebreitet und die warme Strömung des vorigen Tages abgeschnitten. Die Warmströmung über Osteuropa, die vom 19. bis zum 20. III. gegen NE nicht vordrang, ist am 21. III. bis nach Obdorsk und Surgut vorgestoßen, wo den Tag vorher eine Anomalie von -11° herrschte. Die abnorme Kälte in Nordasien wird daher allmählich durch diesen Wärmeverstoß aus Südwesten reduziert und gegen Osten verschoben. Die früher erwähnte warme Strömung bei Kirensk ist bis zum 21. III. offenbar durch die schwache kalte Zone bei Verkhoiansk durchgebrochen und hat sich mit der warmen Zone in Ostasien verbunden. Gleich nach diesem Durchbruch hat sich die kalte Strömung aus Nordasien neuerlich gegen Südosten ausgebreitet. Unter dem Breitenkreis von 70° finden sich am 21. III. zwei Kalt- und zwei Warmströmungen.

Ich habe von den 90 Tageskarten die vom 16. bis 21. III. in den Figuren 1 bis 6 gezeigt, weil in diesen sechs Tagen starke Veränderungen in der Zahl der Zirkulationen vor sich gehen. Wir sahen in hohen Breiten anfangs drei, dann zwei und nur eine Zirkulation. Ich teile später die Häufigkeit dieser Zirkulationen an allen 90 Tagen mit. Doch sei hier bemerkt, daß das Zentrum der Zirkulationen, die Kältequelle, zu der die warmen Strömungen hin- und von der die kalten abfließen, natürlich nicht nur das Polargebiet sein muß; dies wäre der Fall, wenn die Erde eine ganz gleichmäßige Oberfläche hätte, weil dann im Winter der Pol die kälteste Stelle der Erde wäre. Wir müssen auch die weit im Norden liegenden Kontinentalgebiete, den Norden von Nordamerika, Grönland und besonders Nordasien, zu dem Gebiet der Kältequelle hinzuzählen. Da die warmen Strömungen bei Zirkulationen stets die Tendenz haben, das Gebiet der Kältequellen zu treffen, wo durch Ausstrahlung der Luftdruck in der Höhe sinkt, so ist nicht allein der Pol als die Richtung der Warmströmungen und als Zentrum der Zirkulationen anzusehen, sondern z. B. auch Nordasien, wohin in den Karten der Figuren 1 bis 6 sich die warme Strömung über Osteuropa allmählich hinzieht.

Als ein zweites Beispiel solcher Strömungserscheinungen stelle ich in Fig. 7 die Ausbreitung einer kalten Masse aus Nordasien und die Zuströmung einer warmen Masse in dieses kalte Gebiet vom 1. bis 17. Januar dar. Hier sind die in der Bewegungsrichtung vorne liegenden Linien der Temperaturanomalie $\pm 5^{\circ}$ C. im Laufe der 17 Tage auf der Nordhalbkugel angegeben, und zwar sind die kalten und die warmen Strömungen auf zwei Karten, getrennt voneinander, dargestellt. Die obere Karte der Fig. 7 zeigt die Ausbreitung der kalten Masse. Am 3. I. liegt die Linie von -5° in Nordasien. In den folgenden Tagen bis zum 7. I. breitet sie sich nach Süden, Südwesten und

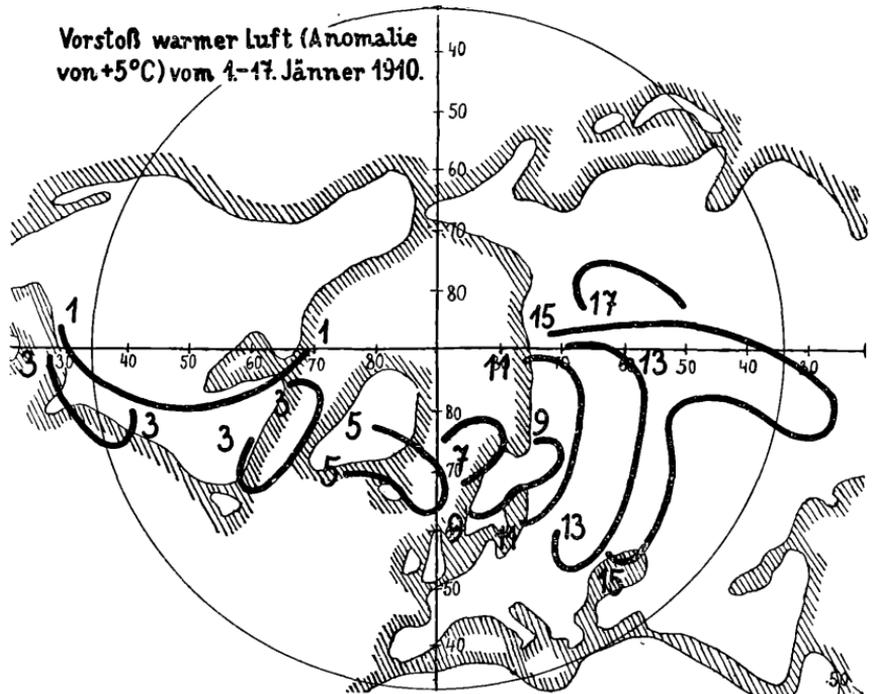
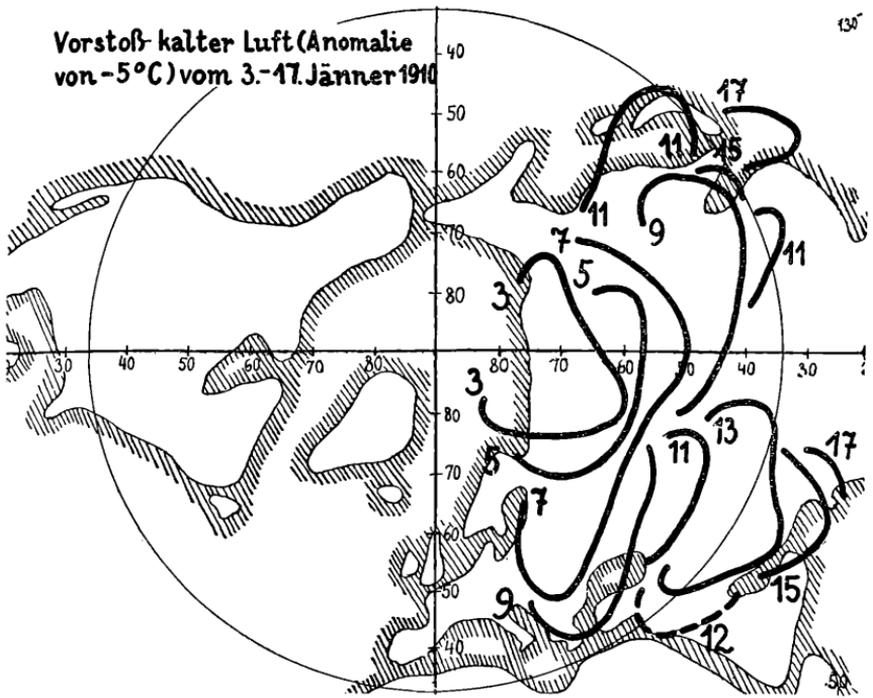


Fig. 7.

Südosten aus (die Figur gibt die Lage der — 5° Linie von zwei zu zwei Tagen). Am 9. I. beginnt die kalte Strömung sich in zwei Teile zu teilen; der eine wandert nach Südosteuropa, der zweite gegen Ostasien. Die erste Strömung kehrt aus Westen wieder zurück und bewegt sich nach Süden, erreicht am 13. das Rote Meer und am 15. den Norden des Indischen Ozeans. Die zweite Strömung teilt sich neuerdings am 11. in zwei Teile, von denen der eine nach Osten (Japan), der zweite nach Süden (Südchina) reicht. Später sammelt sich die kalte Strömung wieder in der Mitte der beiden Teile und wandert gegen Südosten, wo sie am 17. die Breite von 20° südlich von Japan erreicht.

Die untere Karte der Fig. 7 stellt die Wanderung warmer Massen dar, die um die Mitte des Monats das Gebiet erreichen, das eine Woche früher abnorm kalt war. Bei einem Rückblick in die früheren Karten zeigte sich, daß diese warme Strömung, genauer gesagt die Linie der Anomalie von $+5^{\circ}$, aus dem Osten von Nordamerika herrührt. Diese warme Strömung vom 1. Januar teilte sich am 3. in zwei Teile, von denen der eine gegen Südosten, der andere gegen Nordosten wanderte. Vom 3. bis zum 7. I. erreichte der nördliche Teil, über den Norden des Atlantik hinüberziehend, die Nordseite von Skandinavien, aus der ursprünglichen Nordostrichtung wurde wesentlich eine Ostrichtung. Dann aber, am 9. und 11. I., strömte die warme Masse in der Richtung gegen SE nach Nordasien. Hier wanderte sie zwischen die kurz vorher geteilten Kälteströmungen, schritt ziemlich genau gegen Süden fort (15. I.) und zog erst am 17. I. noch weiter gegen Osten. Daraufhin verlor sich die Linie der Anomalie $+5^{\circ}$ gänzlich, wie auch nach dem 17. I. die beiden Linien -5° am Indischen Ozean und südlich von Japan verschwanden.

Dieser eigentümliche Vorgang zeigt, wie die kalte Masse die warme an sich zieht. Der Einbruch der warmen Massen erfolgt hier von Norden, beziehungsweise Nordwesten, das Zentrum dieser Zirkulation liegt um die Mitte des Monats sehr weit im Süden von Asien. Allmählich erfolgt ein Ausgleich der Temperaturen der beiden Strömungen durch ihre Vermischung, womit die Energie der Strömung endet.

Mit diesem Fall der Fig. 7 ist wieder nur ein Beispiel solcher Strömungsvorgänge gegeben. Sie sind im übrigen von großer Verschiedenheit und es wird sehr genaue Untersuchungen brauchen, um solche Vorgänge für die Wettervorhersage näher beurteilen zu können.

Im folgenden erwähne ich noch einige andere Strömungsbeispiele, ohne sie auf Karten darstellen zu können:

1. bis 9. Januar, Nordamerika:

- 1./I. Sehr warm in Nordamerika.
- 2./I. Kälteeinbruch im N von Nordamerika, zwei sehr warme Gebiete im SW und NE des Kontinents.
- 3./I. Weitgehender Vorstoß der kalten Strömung nach S und SW. Warmströmung östlich, und zwar erstes Maximum südlich des

Kältemaximums (New Orleans), zweites Maximum nordöstlich desselben über Labrador.

4./I. Die letzte Warmströmung verschiebt sich östwärts zwischen Grönland und Island. Das Kältemaximum (-10°) stößt gegen NE bis New Brunswick vor. Das zweite Wärmemaximum bleibt über New Orleans, eher sogar etwas westlich.

5./I. Neuer Warmeinbruch aus W, vom Pazifischen Ozean über Nordwestkanada bis York Factory.

6./I. Vorstoß der Warmzone aus New Orleans gegen NE bis New Brunswick, wodurch das Kältegebiet in zwei Teile geteilt wird: eines von El Paso bis Chicago (-11°), das zweite über New Foundland, mit geringerer Intensität. Schwaches Fortschreiten des Wärmeeinbruches durch Nordwestkanada.

7./I. Das große Kältemaximum bleibt im S, verschiebt sich sogar noch mehr gegen E (New Orleans -10°). Die Warmströmung bricht durch die Kaltströmung im E durch und reicht mit Intensität $+5^{\circ}$ bis nach New Foundland. Weitere Kältezufuhr aus N, kein Durchdringen der westlichen Warmströmung durch die kalte Zone.

8./I. Das warme Maximum wandert von New Foundland östlich bis in die Mitte des Atlantik.

9./I. Kälteeinbruch aus Labrador gegen S durch den Atlantischen Ozean. Trennung der Warmströmung über dem Atlantik in zwei Teile usw.

Von diesem Beispiel sei besonders hervorgehoben, wie der Einbruch kalter Luft gegen Süden auf der Südseite eine intensiv warme Strömung antrifft und wie dann allmählich die kalte Masse sich südwestwärts um die warme, die letztere nordostwärts um die kalte herumbewegt, bis schließlich das Wärmemaximum im Nordosten, das Kältemaximum im Südwesten des Kontinentalgebietes liegt. Die beiden Maxima haben hier nicht die Tendenz, sich zu einem mittleren Temperaturwert zu vermischen, sondern sie entfernen sich voneinander; die Strömungstendenz führt die warme Masse in noch höhere Breiten, die kalte in noch niedrigere. Wir haben also nicht anzunehmen, daß eine Zyklone die kalten und warmen Massen vereinigt, mithin die Zirkulation ganz abschließt, sondern die Zirkulation führt meist über das Zyklonalgebiet hinaus, die Zyklone erzeugt eine Vermischung eines Teiles der beiden Strömungen, aber durchaus nicht der ganzen Ströme.

27. bis 31. Januar, Asien.

27./I. Starke Kältezone von England über Skandinavien bis Nordasien, südlich davon und in Ostasien warme Strömung.

28./I. Vorstoß der Warmströmung aus S nach Archangelsk, Vorstoß der Kaltströmung westlich und östlich dieser Warmströmung, und zwar über Mitteleuropa bis Nordägypten, im E um etwa 10° gegen S.

29./I. Durchbruch der Warmströmung über Malje Karmakuly bis mindestens 80° Breite; Vorstoß der beiden Kaltströmungen noch weiter gegen S (bis Suakin in Oberägypten und bis Hinterindien).

Verschiebung des Kältemaximums nach Kirensk gegen E. Die westliche Kaltströmung macht einen Nebenausschlag aus der Südrichtung gegen NE.

30./I. Letzterer Ausschlag ist intensiv geworden (Viatka — 9°, Ekaterinburg — 7°). Offenbar wird von der Hauptströmung der kalten Masse gegen S eine Teilströmung nach E abgelenkt, und zwar durch das Vorüberströmen einer warmen Masse im Osten gegen N. Also wieder eine zyklonale Ablenkung der Kaltströmung, aber nur eines Teiles derselben; die Hauptströmung geht weiter nach Oberägypten.

31./I. Durchbruch der seitlichen Kaltströmung durch die Warmströmung gegen E und Verbindung mit der kalten Hauptmasse in Ostasien. Westlich davon Durchbruch einer warmen Strömung aus Südeuropa durch die kalte Zone und Verbindung mit der warmen Masse, die im östlichen Gebiet durch die Kälteströmung abgeschnitten worden war. Zugleich Durchbruch ozeanischer Warmströmung durch eine kalte Strömung, die von Island gegen S liegt, und Verbindung der Ozeanströmung mit jener warmen, die, wie früher erwähnt, aus Südasien (Persien) gekommen war. Diese intensive Warmströmung vertreibt bis zum 2. II. die intensive Kaltzone von Nordostasien vollständig und verschiebt sie über das Beringsmeer nach Alaska.

28. Februar bis 6. März, Asien.

Am 28./II. lag, wie in dem früheren Fall, eine warme Strömung aus Arabien bis Nowaya Semlja zwischen zwei kalten im Westen und Osten derselben. Der weitere Vorgang war aber ein ganz anderer als der des früheren Beispiels.

1./III. Bewegung der Warmströmung im Norden nach E mit starker Intensität (Obdorsk + 12°), zugleich Einbruch einer Teilströmung von der kalten östlichen Strömung her gegen W, südlich des eben erwähnten wärmsten Gebietes.

2./III. Vorstoß der Warmströmung gegen E bis Kirensk, zugleich Vorstoß der kalten Teilströmung gegen W mit starker Abkühlung (Saratow — 10°) und zugleich Vorstoß der kalten Hauptzone östlich der Warmströmung auf der Nordseite letzterer gegen W, so daß nun die warme Zone im N und im S je eine kalte parallel liegende Zone hat.

3./I. Das gleiche; starke Kälte nördlich (Dodinka — 14°).

4./III. Durchbruch der warmen Strömung durch die kalte im Osten bis Nikolaewsk am Amur. Zugleich vereinigen sich die beiden kalten Zonen, indem sie die Verbindung der warmen Strömung mit dem Südwesten abschneiden. Letztere hat neue Verbindung mit Indien.

5./II. Die kälteste Zone wandert westwärts, die wärmste ostwärts, so daß die Extrempunkte der beiden jetzt Ekaterinburg (— 11°) und Nikolaewsk (+ 10°) sind.

6./II. Die Warmströmung wendet sich schließlich auch gegen N (Verkchoiansk), sie durchbricht also die früher nördlich von ihr gelegene Kaltströmung jetzt im NE der kältesten Stelle.

Wir haben in diesem Fall eine Warmströmung nach Osten zwischen zwei Kaltströmungen nach Westen. Sie erzeugen auf der

Nordseite der Warmströmung zyklonale, auf der Südseite antizyklonale Drehung. Die Warmströmung wendet sich nordostwärts, die beiden kalten verbinden sich hinter ihr miteinander.

Alle diese Einzelercheinungen sind sehr verschieden. Es ist nicht gut möglich, ohne Karten eine genauere Vorstellung derselben zu vermitteln. Ich will daher solche Einzelfälle hier nicht weiter erwähnen, obwohl eine große Zahl derselben vorliegt.

III. Häufigkeit der kalten und warmen Strömungen.

Um ein Bild über die Zahl der Zirkulationen zu erhalten, welche auf der Nordhalbkugel nebeneinander liegen, habe ich die Häufigkeit der warmen und kalten Streifen aus den Karten der 90 Tage vom 1. I. bis 31. III. ausgezählt, und zwar in verschiedener Weise. Auf einem Breitenkreis ist die Zahl der Gebiete, welche übernormale Temperatur haben, naturgemäß stets identisch mit der Zahl der Gebiete von unternormaler Temperatur. Es fallen über einen Breitenkreis immer gleich viel warme und kalte Streifen; ein Paar derselben, ein Doppelstreifen, bildet eine Zirkulation. Ob ein warmer Streifen breiter ist als ein kalter oder umgekehrt, ist erst im letzten Abschnitt dieser Arbeit berücksichtigt. Tabelle 2 gibt zunächst an, wie oft in den 90 Tagen ein Doppel- oder Zirkulationsstreifen auf einem Breitenkreis einmal, zweimal usw. auftritt.

Tabelle 2.

Häufigkeit der Zirkulationen über verschiedenen Breitenkreisen.

Breite	Zahl der Zirkulationsstreifen							Summe
	1	2	3	4	5	6	7	
70°	10	51	28	1	0	0	0	90
60	1	19	57	11	2	0	0	90
50	1	6	32	41	9	1	0	90
40	0	8	25	37	19	1	0	90
30	0	7	20	32	20	11	0	90
20	0	1	14	29	32	12	2	90
Summe..	12	92	176	151	82	25	2	540

Unter 70° Breite treten am häufigsten zwei Zirkulationen auf, unter 60° drei, unter 50°, 40° und 30° vier Zirkulationen, unter 20° deren fünf. Niemals findet sich unter 70° Breite eine bloße Kaltströmung nach Süden, stets tritt auch mindestens eine Warmströmung auf, was zu erwarten war, da die Luft aus dem Polargebiet nicht abfließen kann, ohne daß gleichfalls an der Erdoberfläche warme Luft zufließt; denn daß die warme Luft bloß in der Höhe zum Pol fließt, ist wegen der ablenkenden Kraft der Erdrotation nicht möglich. Unter 70° Breite finden sich auch noch häufig drei Zirkulationen, aber nur einmal vier und keine weiteren mehr. Im Gebiet von 60° ist die

dreiteilige Zirkulation am häufigsten. Diese hat auch im Gebiet der Hemisphäre von 20 bis 70° die größte Häufigkeit. Doch treten unter 60° Breite auch schon ausnahmsweise fünf Zirkulationen auf. Die Häufigkeit der mehrfachen Zirkulationen nimmt gegen S immer mehr zu, was wegen des größeren Erdumfanges auf niedrigen Breitenkreisen begreiflich ist.

Die Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Zirkulationsstreifen unter einer gewissen Breite kann dazu verwendet werden, abzuschätzen, wie breit im Durchschnitt ein Zirkulationsstreifen ist. Der Umfang eines Breitenkreises $U = 2 r \pi \cos \varphi$ (r Erdradius, φ Breite), dividiert durch die Zahl der Zirkulationsstreifen, gibt uns diese Breite. Da aber die Zahl der Zirkulationsstreifen in den 90 Tagen recht verschieden ist, erhalten wir ein möglichst günstiges Bild, wenn wir die Häufigkeit der verschiedenen Streifenzahl prozentuell auswerten. Wir setzen daher für die Breite B eines Zirkulationsstreifens die folgende Gleichung an, die nach Tabelle 2 für 70° Breite gilt:

$$B = \frac{U}{90} \left(\frac{10}{1} + \frac{51}{2} + \frac{28}{3} + \frac{1}{4} \right).$$

So ergeben sich folgende Breiten der Zirkulationsstreifen für die verschiedenen Breitenkreise:

$\varphi = 70^\circ$	$B = 6900 \text{ km}$
60	7240
50	7660
40	8700
30	9200
20	8800

Die Breite der Zirkulationsstreifen nimmt gegen S etwas zu. Dies ist auch begreiflich, da bekanntlich in niedrigen Breiten die Winde weniger intensiv sind als in hohen.

Eine Zyklone oder Antizyklone bildet sich in höheren Breiten zwischen einem warmen und kalten Strömungsstreifen. Die durchschnittliche Breite der Zyklone wurde von Hann mit 2000 bis 3000 km angegeben. Die Doppelbreite der kalten und warmen Strömung können wir in mittleren Breiten zu 7000 bis 8000 km annehmen. Demnach umfaßt das Zyklonalgebiet nur etwa ein Drittel dieser Strömungen aus beiden Richtungen, es besteht also nur aus dem innersten Teil dieser Zirkulation, wie dies seinerzeit schon Bigelow schematisch gezeichnet hat.

Um die Größe der Temperaturabweichungen näher kennenzulernen, habe ich ferner die Häufigkeit des Auftretens von Gebieten mit $\pm 5^\circ$, beziehungsweise $\pm 10^\circ$ und darüber ausgezählt, und zwar aus den 90 Tageskarten für verschiedene Breitenzonen. Wie früher erwähnt, sind in den Karten Linien von $\pm 5^\circ$ und Linien von $\pm 10^\circ$ Temperaturanomalie eingezeichnet. In Tabelle 3 ist angegeben, wie oft unter den 90 Tagen z. B. nur ein Gebiet mit $> 5^\circ$ Anomalie

auf einer Breitenzone vorkommt, ferner wie oft zwei, drei oder mehr solche Gebiete auf der gleichen Breitenzone liegen. Die Kolonne rechts von diesen Häufigkeitszahlen gibt die Summe aller solcher Gebiete, die in den 90 Tagen auf einer Breitenzone zu finden sind.

Tabelle 3.

Häufigkeit der Anomaliengebiete von $\pm 5^\circ$, beziehungsweise $\pm 10^\circ$ C. unter verschiedenen Breiten.

Breite	Zahl der vorkommenden Anomaliengebiete										
	1	2	3	4	5	Summe	1	2	3	Summe	
	$> 5^\circ$						$> 10^\circ$				
$> 70^\circ$	47	31	5	0	0	124	28	7	0	42	
70—60	12	56	18	4	0	194	45	16	2	83	
60—50	7	30	36	15	2	245	42	11	3	73	
50—40	11	45	28	5	1	210	35	5	1	48	
40—30	39	35	10	1	0	143	16	0	0	16	
30—20	42	24	1	1	0	97	2	0	0	2	
	$> -5^\circ$						$> 10^\circ$				
$> 70^\circ$	41	34	5	0	0	124	32	4	1	43	
70—60	18	41	25	5	0	195	40	16	0	72	
60—50	15	38	29	6	0	202	37	5	1	50	
50—40	28	33	19	6	0	175	20	1	0	22	
40—30	52	14	6	1	0	102	12	0	0	12	
30—20	33	10	0	0	0	55	6	0	0	6	

Diese Summenzahlen ergeben für die Anomaliengebiete über $\pm 5^\circ$ die größte Häufigkeit in der Breitenzone von 60 bis 50°; doch reicht diese große Häufigkeit noch in ähnlicher Weise bis 70° und südwärts bis 40°. Die Anomalien größerer Intensität (über $\pm 10^\circ$) treten am häufigsten im Gebiete zwischen 70 und 60° Breite auf. Sie sind drei- bis viermal seltener als die von $\pm 5^\circ$.

Die Gesamtzahl der warmen Anomaliengebiete ist etwas größer als die der kalten. Dies rührt daher, daß die Abkühlungen in höheren Breiten meist intensiver sind als die Erwärmungen; die größere Zahl der kleineren positiven Anomalien ergibt dann ungefähr die gleiche Abweichung von der anfangs erwähnten Durchschnittskurve des Temperaturverlaufes wie die kleinere Zahl der großen negativen Anomalien.

Die Häufigkeit des Auftretens mehrerer Anomaliengebiete in einer Breitenzone (Tabelle 3) zeigt folgendes: nördlich von 70° Breite tritt bloß ein Warmgebiet ($> 5^\circ$) am häufigsten auf, zwei Warmgebiete etwas seltener, drei sehr selten. Analog ist dies mit dem Kältegebiet ($> -5^\circ$). In den Breiten zwischen 70 und 40° sind zwei bis drei solche Gebiete häufiger, noch weiter südlich wieder seltener. Die noch intensiveren Warm- und Kaltgebiete ($> \pm 10^\circ$) treten in allen Breiten am häufigsten nur einmal auf einem Breitenkreis auf, und

zwar am öftesten zwischen 70 und 60°, aber auch noch häufig zwischen 60 und 50° Gegen die Breite von 20° hin sind sie recht selten zu sehen.

Die positiven Anomaliegebiete von > 5° findet man auch viermal auf einem Breitenkreis nicht so selten, während die negativen etwas seltener vorkommen. Das drei-, vier- und fünfmalige Auftreten dieser Warmzonen auf einem Breitenkreis ist im ganzen viel häufiger als das der gleichen Kaltzonen. Die intensiven Kältegebiete scheinen sich mehr zusammenzuhalten als die intensiven Wärmegebiete. Die warmen Strömungen teilen sich oft und erzeugen an verschiedenen Stellen durch ihre rasche Bewegung gegen höhere Breiten starke Erwärmung, während die intensiven Kältegebiete häufiger auf größerem Areal geschlossen bleiben. Die warme Luft erscheint beweglicher als die kalte, weil die letztere an den Erdboden gebunden ist und durch Reibung an demselben in der Bewegung gehindert wird.

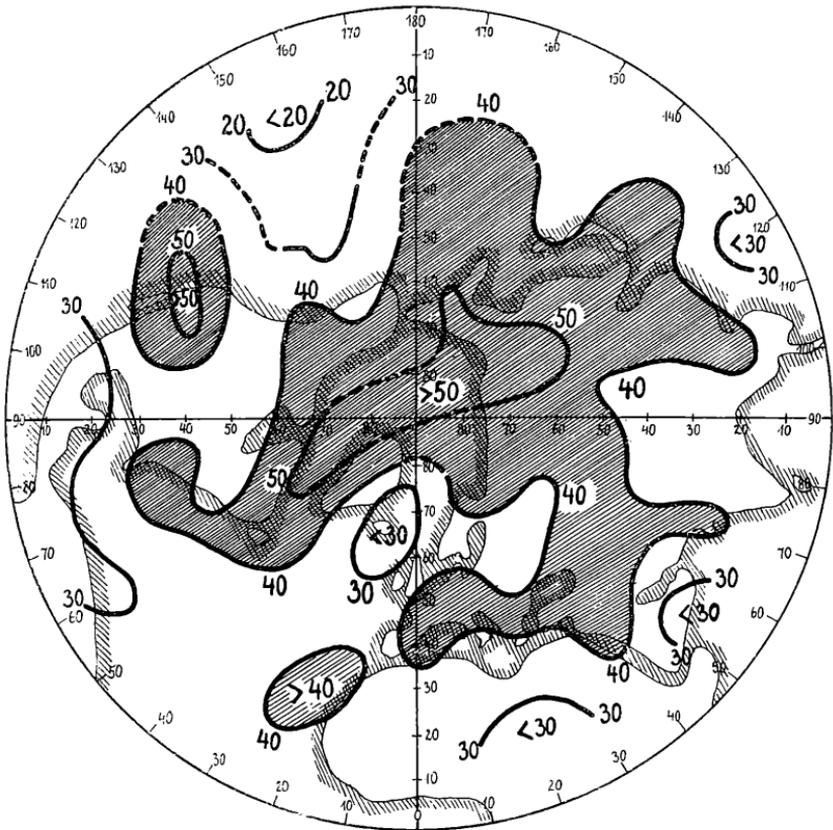
IV. Verteilung der Häufigkeit kalter Strömungen auf der Nordhalbkugel.

Um festzustellen, in welcher Weise die Stromverteilung kalter und warmer Luftmassen auf der Nordhalbkugel von der Verteilung der Kontinente und Meere, also von der Ortslage, abhängt, habe ich die Häufigkeit des Auftretens negativer Anomalien für eine große Zahl von Orten der Halbkugel aus den 90 Tageskarten ausgezählt. Hiefür wurden die 36 Punkte eines Breitenkreises von 0°, 10°, 20° bis 170° ö. L. und von 10°, 20°... bis 180° w. L. benützt, und zwar für die Breiten 70°, 60°, 50°, 40°, 30°, 20°. So ergab sich für jeden dieser Orte eine Zahl, die angibt, wie oft unter 90 Fällen

Tabelle 4.
Häufigkeiten der negativen Anomalie.

Breite	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
	Osthälfte																		
70°	30	37	40	41	39	48	45	41	42	45	50	54	53	51	53	52	46	45	
60	29	37	38	34	32	39	41	39	41	45	46	54	48	52	44	43	44	49	
50	43	41	50	31	36	47	43	44	44	46	37	46	47	42	44	45	49	44	
40	48	37	44	41	41	44	42	37	36	34	39	48	45	42	39	37	47	45	
30	38	38	37	37	45	38	39	40	33	36	38	39	42	42	40	39	44	45	
20	32	31	26	31	40	30	32	42	37	35	43	40	29	43	41	39	38	36	
	Westhälfte																		
70°	28	31	36	41	44	50	58	56	49	50	46	49	47	44	48	44	43	44	
60	31	28	34	38	45	52	48	40	41	39	37	44	45	41	31	37	42	44	
50	37	32	37	41	45	42	38	37	37	35	33	35	33	38	29	31	36	43	
40	36	37	30	31	41	40	37	41	37	37	51	45	35	30	27	28	33	40	
30	35	45	38	33	33	33	43	41	34	39	45	57	45	34	23	23	33	40	
20	35	39	42	37	31	30	35	36	27	25	35	37	48	30	17	18	22	33	

die Temperaturanomalie negativ ist. Die Differenz dieser Häufigkeit gegen 90 gibt dann auch angenähert die Häufigkeit der positiven Anomalien, also der warmen Strömungen. Allerdings kommt es nicht selten vor, daß eine Nulllinie auf der Tageskarte durch einen ausgewählten Punkt hindurch oder sehr nahe an ihm vorübergeht. Diese Fälle sind weder als positive noch als negative Anomalien anzusehen; ihre Häufigkeit beträgt unter 90 Fällen schätzungsweise 10.



Häufigkeit der kalten Strömungen während der 90 Tage vom 1./I.-31./III.1910.

Fig. 8.

Zieht man diesen Betrag von der erwähnten Differenz ab, so erhält man ein besseres, wenn auch nicht ganz sicheres Resultat für die Häufigkeit der positiven Anomalien.

In Tabelle 4 sind die Häufigkeiten der kalten Fälle angegeben. Jede Zahl bezieht sich auf die Gesamtsumme von 90 (nicht Prozente).

Die Zahlen der Tabelle 4 sind in Fig. 8 graphisch dargestellt, wobei die Gebiete mit Häufigkeit über 40 schraffiert sind. Hier sieht man zunächst, welche Gegenden des Polargebietes die häufigsten Kälteausbrüche oder Kälteströmungen in niedrigere

Breiten verursachen. Es ist dies in erster Linie (Häufigkeit über 50 in 90 Tagen, also über 56%) die Baffinsbay zwischen Labrador und Grönland und das Gebiet von Nordostasien. Weiter sind die Gebiete in höheren Breiten mit geringster Häufigkeit von Wichtigkeit; sie geben die häufigsten Warmströmungen an. Hier tritt vor allem das Gebiet zwischen Ostgrönland und Skandinavien mit der Häufigkeit 30 hervor, also der östliche Teil des Atlantischen Ozeans; ähnlich verhält sich der östliche Teil des Pazifischen Ozeans, nur dringen die warmen Strömungen hier nicht so oft in hohe Breiten vor wie auf dem Atlantik.

Auffallend ist weiter die häufige Kaltströmung entlang des Ostens von Nordamerika bis zu 30° Breite und ähnlich jene entlang von Ostasien bis Südchina, ferner die Kaltströmung aus Nordwestasien nach Süden und dann nach Westen ins europäische Kontinentalgebiet hinein.

Die Form dieser Strömung ist der von Ostamerika ähnlich, nur noch stärker gebogen. Nördlich von dieser kalten Strömung aus Osten dringt zwischen 50 und 60° Breite häufig warme Strömung vom Atlantik durch die Ostsee gegen den Kontinent vor, und ganz ähnlich wandert die warme Strömung vom Pazifik her durch Westamerika an die erwähnte kalte Strömung im Osten heran. Sowohl an die Spitze der südwestwärts gekrümmten kalten Strömung in Westeuropa wie an die in Ostamerika schließt sich auf der Westseite des Kontinentalgebietes mit einigem Abstand eine neuerliche kalte Zone an (Kanarische Inseln und Südkalifornien). In Mittelasien (geographische Länge 80 bis 90°) tritt eine dritte Zone mit größerer Warmhäufigkeit auf, die zwischen den häufigen Kälteströmungen von Ost- und Westasien liegt. Außerdem findet man schließlich unter 20° Br. an sehr vielen Stellen die Häufigkeit niedriger als 30, im Süden sind die negativen Anomalien viel seltener als im Norden, wie schon aus Tabelle 3 hervorging.

Im ganzen stellt uns Fig. 8 die grundsätzlichen, wenn auch nur durchschnittlichen Strömungsformen auf der nördlichen Halbkugel dar. Wir sehen einen Ausbruch der kalten Massen vom Polargebiet her in der Richtung gegen SW, einen Einbruch der warmen Massen in hohe Breiten in der Richtung gegen NE. Die letzteren liegen wesentlich auf den Ostseiten der Ozeane, die Kälteeinbrüche stellen sich westwärts von diesen warmen Strömungen an. Nur in Asien tritt eine dritte Warmströmung im Kontinentalgebiet auf. Wenn wir uns die Warmströmung von Island nordwärts vorstellen, so ist zu erwarten, daß bei der Zirkulation diese Warmströmung sich westwärts und ostwärts teilt, sich sohin im Polargebiet abkühlt und dann als kalte Masse gegen Labrador und gegen Nowaja Semlja ausströmt oder noch weiter gegen Ostasien. Ähnliche Teilungen dürfte die Warmströmung, die Alaska erreicht, vollführen. In analoger Weise wird z. B. die Kaltströmung, welche nach Westeuropa wandert, sich in eine Strömung gegen den Atlantischen Ozean und eine zweite gegen Afrika teilen, wobei sich in diesen warmen Gebieten die Kälte

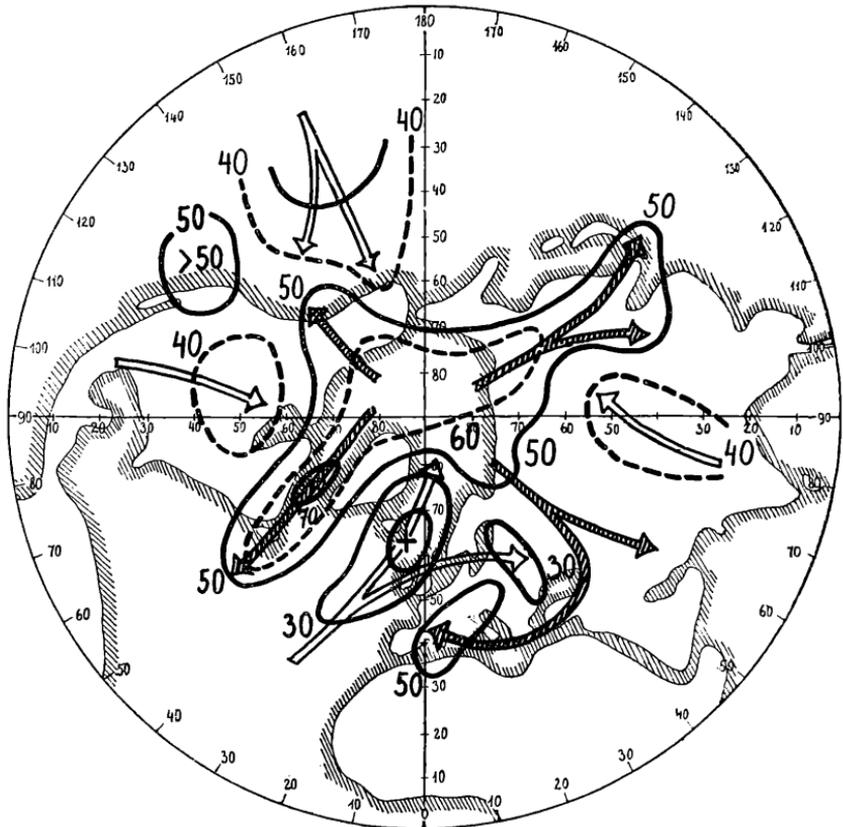
allmählich verliert. Wir können demnach weder im Polargebiet noch im Tropengebiet erwarten, daß wir scharfe Trennungsflächen zwischen kalter und warmer Strömung finden. Sie sind nur in dem Zwischengebiet anzunehmen, wo weder die Wärmequelle noch die Kältequelle eine bedeutende Rolle spielt, sondern wo die kalten und warmen Massen aneinander vorüberströmen.

Im folgenden habe ich noch vier Karten berechnet, welche die Häufigkeit kalter Strömungen an jenen Tagen angeben, wo an einem bestimmten Ort der nördlichen Halbkugel stets kalte oder warme Strömung herrscht. Damit ist eine statistische Beziehung einer ausgewählten Strömung an einem Ort zu den Strömungen in den anderen Gebieten der Halbkugel gegeben. In Fig. 8 war zu sehen, daß in höheren Breiten unter 10° w. L. die kalten Strömungen selten vorkommen. Ich habe daher zunächst die Tage ausgewählt, an welchen unter 60° Br. und 10° w. L. warme Strömung erscheint; dies sind 49 Fälle. Für diese Tage wurde ausgezählt, wie oft an jedem Punkt von 10° zu 10° Br. und L. negative Temperaturanomalie erscheint, und diese Häufigkeitszahlen wurden in Prozente der 49 Fälle umgerechnet. Das Ergebnis dieser Auszählung ist in Fig. 9 durch Linien gleicher Häufigkeit dargestellt. Der ausgewählte Punkt mit nur warmer Strömung (10° w. L., 60° Br., Häufigkeit der kalten Strömung 0%) ist durch ein Kreuz auf der Karte bezeichnet.

Man ersieht aus den Linien der Fig. 9, daß westlich von der Warmströmung sehr häufig eine Kaltströmung besteht; das Maximum über 70% liegt unter 60° w. L. in gleicher Breite, die Entfernung der Mitte der Kaltströmung von der Mitte der Warmströmung beträgt 2780 km , womit der ungefähre Durchmesser der dort normalen Zyklone gegeben ist. Auffallend erscheint ferner die Häufigkeit kalter Strömung in der ungefähr um den halben Breitenkreis von der ersten entfernten Stelle in Ostasien; im Norden dieses Gebietes beträgt die Häufigkeit über 60% , es scheint also, daß gewöhnlich bei einer Warmströmung westlich von Nordeuropa eine Kaltströmung in Ostasien vorkommt. Ein drittes solches Gebiet erscheint über Nordwestkanada, ein viertes schwächeres über Nowaja Semlja. Intensivere Warmströmungen findet man nördlich von Honolulu gegen Alaska, ferner in Osteuropa. Zugleich gibt es noch einige Gebiete mit mehr Kaltströmung ($> 50\%$) und mehr Warmströmung ($< 40\%$). So bildet sich z. B. über Südwesteuropa bei der starken Warmströmung im östlichen Atlantik eher eine kalte als eine warme Zone aus, während über Norddeutschland und die Ostsee eine Abzweigung der warmen Strömung nach Osten führt. Die eingezeichneten Pfeile geben eine wahrscheinliche Form der häufigsten Strömungen. Im wesentlichen finden wir hier vier warme und vier kalte Strömungen, die von der Lage der Kontinente und Ozeane abhängen.

Der zweite Fall (Fig. 10) betrifft die Häufigkeit der kalten Strömungen auf der Halbkugel unter der Bedingung, daß an derselben Stelle, die oben genannt ist (60° Br., 10° w. L.) nicht warme,

sondern kalte Strömung herrscht. Hiefür finden sich unter den 90 Tagen nur 31. An dem mit dem Kreuz versehenen Punkt ist die Häufigkeit 100%. Diese kalte Strömung im Osten des Atlantischen Ozeans geht weit nach Süden. Mit ihr verbunden findet man häufig kalte Strömung in Mittelasien ($>70\%$) und im Osten von Asien ($>60\%$), ferner unter 80° w. L. Zugleich liegen drei Zonen mit häufigen Warmströmungen (Kälte $<30\%$) zwischen jenen, und zwar



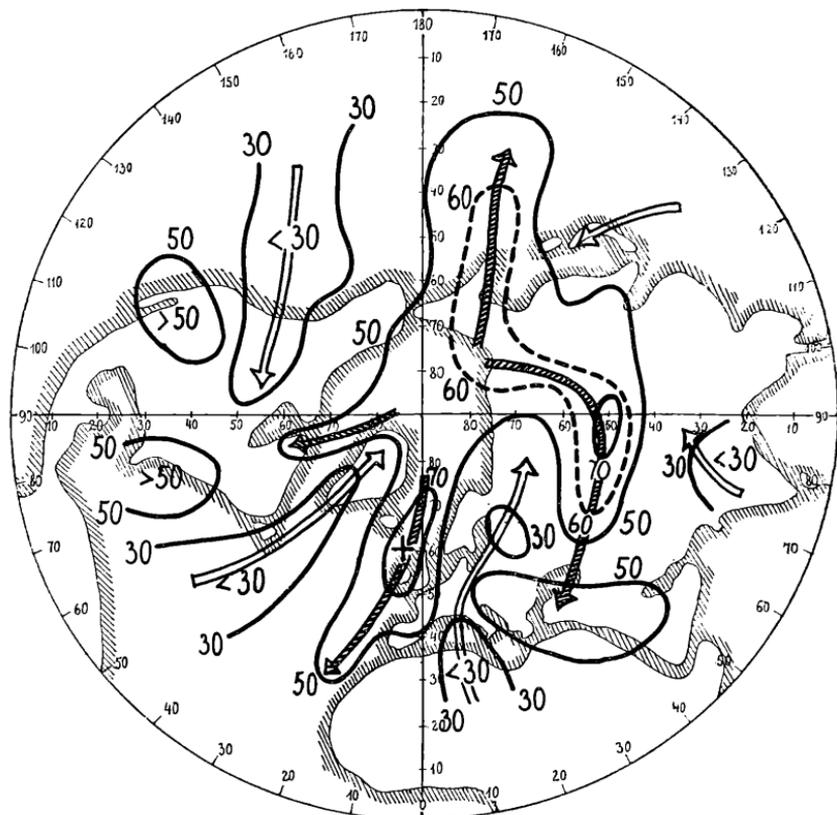
Prozentuelle Häufigkeit von „Kalt“ bei Warm-Strömung unter 60° Br., 10° w. L., 49 Fälle.

Fig. 9.

westlich sowohl wie östlich der Hauptkaltströmung, im W des Atlantik und von Afrika nach Nordosteuropa; die dritte reicht vom Osten des Pazifik nach Nordamerika hinein. Außerdem gibt es noch einzelne kleinere Zonen mit größerer und geringerer Häufigkeit, die sich zum Teil scheinbar an die Hauptströmungen anschließen lassen. Wenn man die Pfeile der Fig. 10 mit jenen der Fig. 9 vergleicht, so findet man manche Ähnlichkeiten, im wesentlichen eine Verschiebung der Strömungen der Fig. 9 nach Osten. Der Ausbruch der Kälte aus Asien gegen SW erscheint in beiden Figuren, ebenso die Neigung

der warmen Strömung in Europa gegen Nordrußland und der im Pazifischen Ozean gegen den Westen von Nordamerika.

In einer dritten Karte (Fig. 11) ist die Häufigkeit der negativen Anomalien unter der Bedingung dargestellt, daß unter 50° Br. und 20° ö. L. (nahe bei Wien) eine kalte Strömung herrscht. Diese Bedingung trifft an 50 Tagen zu. Fig. 11 zeigt wieder die prozentuelle Häufigkeit der Kälte, der Kreuzpunkt bedeutet 100%.

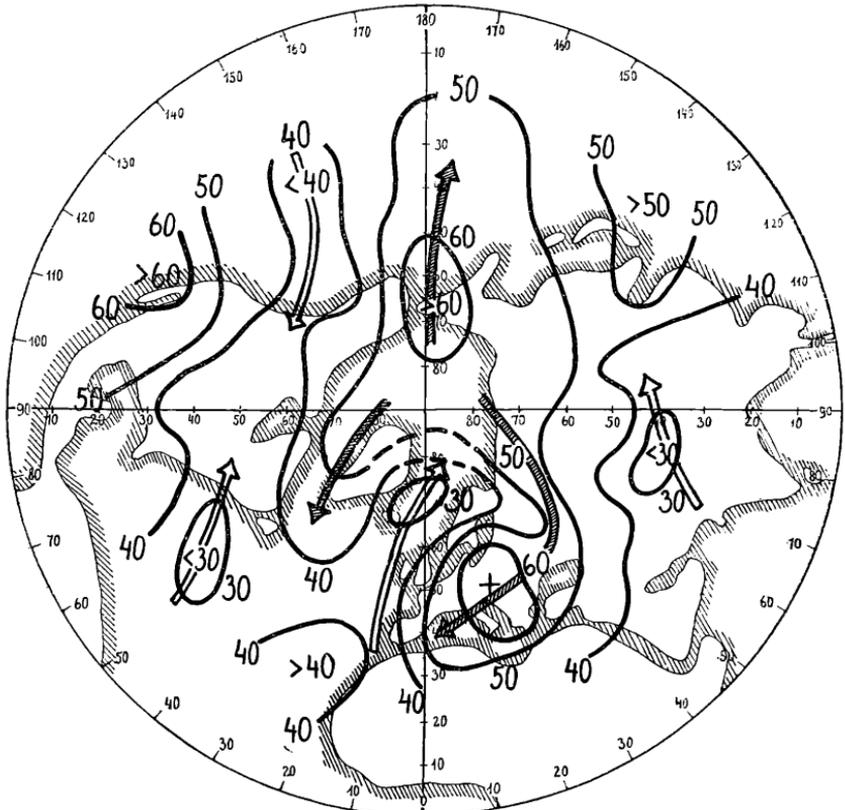


Prozentuelle Häufigkeit von „Kalt“ bei Kalt-Strömung unter 60° Br., 10° w. L., 31 Fälle.

Fig. 10.

Hier finden wir im wesentlichen drei kalte Strömungen, die erste Hauptströmung aus Nordasien nach Mitteleuropa, die zweite über Kamtschatka in den Stillen Ozean, die dritte über die Baffinsbay und Grönland. Die Häufigkeit der Kaltströmungen beträgt hier in entfernteren Gebieten nirgends 70% ; trotzdem sind die Linien, namentlich die von 50% , recht unsymmetrisch gebaut, so daß Zusammenhänge der Strömungen in entfernten Gebieten bestehen. Eine intensive warme Strömung geht über den Osten des Atlantik bis über Island und das Nordkap Europas hinaus. Eine zweite geht

durch Nordamerika hindurch, eine dritte liegt in Asien. Auffallend ist die kalte Zone in Kalifornien mit über 60%. Woher diese Kaltströmung stammt, läßt sich noch nicht angeben. Vermutlich sind einzelne abgeschlossene Zonen von größerer oder geringerer Kältehäufigkeit zeitweise mit verschiedenen Kälteströmungen in Verbindung, so daß man für sie keine Strömungspfeile als Normalrichtungen einzeichnen kann.

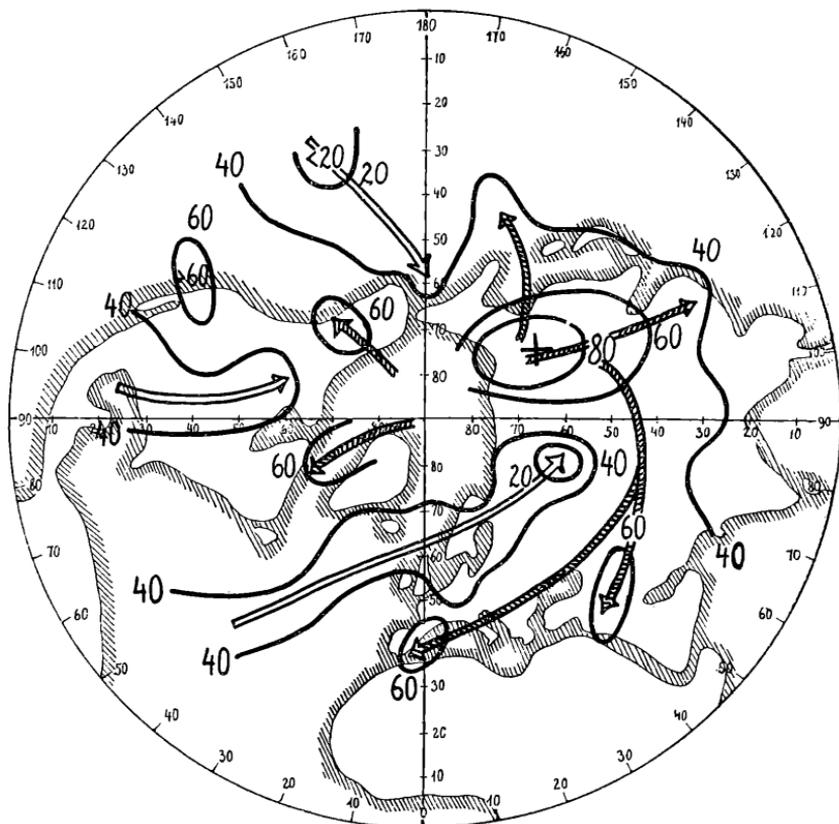


Prozentuelle Häufigkeit von „Kalt“ bei Kalt-Strömung unter 50° Br., 20° ö. L., 50 Fälle.

Fig. 11.

Fig. 12 stellt schließlich die Häufigkeit der negativen Anomalien unter der Bedingung dar, daß in Ostasien, unter 60° Br. und zwischen 110° und 130° ö. L., in 38 Fällen Kälte herrscht. Hier sieht man im wesentlichen ein größeres Gebiet mit über 80% Häufigkeit der negativen Anomalie, das sich mit 60% bis 40° Breite ausdehnt. Am auffallendsten bei dieser kalten Zone ist eine lange Warmströmung, die aus dem Atlantik nach NE und dann nach E bis Nordasien gerichtet ist, wo unter 70° ö. L. die Häufigkeit unter 20% herabgeht. Diese intensive Warmströmung aus großer

Entfernung nach Nordasien deutet eine interessante Form der Zirkulation an. Wenn das größte Kältegebiet nicht nahe dem Pol, sondern in Ostasien liegt, dann wandert die warme Luft vom Süden des Atlantik nicht gegen den Pol, sondern mehr nach Osten. In ähnlicher Weise, wenn auch nicht so deutlich, erscheint am Pazifik die Warmströmung gegen NW, d. h. gegen das große Kältegebiet gerichtet, nicht wie sonst immer gegen N oder NE. Es liegt sogar im Nordosten



Prozentuelle Häufigkeit von „Kalt“ bei Kalt-Strömung unter 60°Br. 110-130°L., 38 Fälle.

Fig. 12.

des Pazifik diesmal ein Kältegebiet. Im ganzen finden wir hier wesentlich drei kalte und drei warme Strömungen. Die Hauptzone der Kälte in Ostasien breitet sich nach Süden, Osten und vermutlich auch sehr weit nach Westen aus, wie dies durch die Pfeile bis Spanien angedeutet ist.

Die Asymmetrie der Häufigkeitslinien ist in diesen vier Fällen sehr intensiv, so daß wirkliche Beziehungen der Strömungen zu den eingesetzten Bedingungen bestehen dürften. Nur sei noch darauf hingewiesen, daß gewisse Gebiete im Verlaufe aller Fälle, d. h. in

den 90 Tagen, größere, andere kleinere Häufigkeit haben. Hiedurch treten die Prozentwerte unter den vier einzelnen Bedingungen an manchen Stellen stets als größere, an anderen als kleinere hervor, wie z. B. in Kalifornien größere Häufigkeit, bei Honolulu geringere in allen Karten besteht. Trotzdem mußte die Häufigkeit auf die Zahl der einzelnen Bedingungsfälle bezogen werden, nicht auf die Häufigkeitswerte jedes Ortes; denn sonst wäre das Verhältnis der Häufigkeit der Kaltströmungen eines Ortes zu einem anderen nicht ausgedrückt worden.

V. Einige theoretische Erörterungen der kalten und warmen Strömung.

Bei Wärmezufuhr am Äquator und Wärmeentziehung in höherer Breite wird eine Zirkulation verursacht; wir können dabei von dem ursprünglichen Gedanken ausgehen, daß die kalte Luft an der Erdoberfläche zum Äquator fließt, die warme Luft darüber, d. h. in der Höhe, in höhere Breiten. Die Grenzfläche zwischen kalter und warmer Luft würde ohne Drehung der Erde horizontal liegen. Dadurch, daß nun die ablenkende Kraft der Erdrotation zur Wirkung kommt, wird auf der nördlichen Halbkugel die warme Luft nach Osten, die kalte nach Westen gepreßt. Durch diese Verschiebung bilden sich unter verschiedenen Meridianen mehrere Zirkulationen auf der Halbkugel. Die Grenzfläche zwischen kalter und warmer Luft neigt sich in einem Meridianstreifen durch die erwähnte seitliche Verschiebung gegen Osten herab; beim Übergang zur zweiten Zirkulation in einem östlich davon gelegenen Meridianstreifen muß die nächste Grenzfläche wieder emporsteigen, dann folgt in östlicher Richtung ein neues Absinken usw. Wo die Grenzfläche gegen Osten zur Erdoberfläche herabsinkt, finden wir östlich derselben warme Strömung, wo sie ansteigt, kalte. Gehen wir von der Vorstellung einer stationären Zirkulation aus, so haben wir die Gleichung für meridionale Strömung zu benützen:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 2 \omega \sin \varphi \cdot v.^1$$

Es ist nun die Frage, wie die Grenzflächen zwischen kalter und warmer Strömung bei meridionalen Bewegungen liegen müssen, damit über einem Breitenkreis eine kalte Strömung, daneben im Osten eine warme, neben ihr östlich wieder eine kalte usw. in stationärer Bewegung bestehen kann. In Wirklichkeit kann es kaum eine stationäre Bewegung geben, wenn die Luft aus einer Breite in eine andere fließt, da die ablenkende Kraft sich dabei verändert. Hierauf komme ich später noch zurück. Zunächst will ich nur angenähert

¹ ρ Dichte, p Druck, Richtung gegen E, ω Rotationsgeschwindigkeit der Erde, φ geographische Breite, v Geschwindigkeit, positiv gegen S.

den Querschnitt dieser Zirkulationen über einem Breitenkreise bei stationärer Strömung darstellen.

Ich gehe dabei von der vereinfachten Annahme aus, daß wir nur zwei Massen von verschiedener, aber konstanter Dichte haben, wie zwei Flüssigkeiten. Die Lage der Grenzfläche zwischen nördlicher Strömung im Westen und südlicher im Osten ist seit langem bekannt. Wenn nun im Osten der warmen Strömung wieder eine kalte kommt, so kann die Grenzfläche nicht in der gleichen Richtung liegen, weil sonst die kalte Masse oberhalb der warmen strömen würde, was sich mit der Stabilität nicht verträgt. Es muß also die zweite Grenzfläche die umgekehrte Lage haben, wie die erste; dies ist für stationäre Bewegung nur in dem Fall möglich, daß der westliche Teil der zweiten kalten Strömung nach Norden strömt, und zwar meist mit größerer Geschwindigkeit als der anliegende warme Teil.

In Fig. 13 ist ein schematischer Querschnitt längs des Breitenkreises durch mehrere solche Strömungen dargestellt, wobei vorausgesetzt ist, daß oberhalb der beiden Massen keine weitere einen Einfluß hat. Wir betrachten also zwei Massen, die ursprünglich in einem rechteckigen Querschnitt übereinander liegen (AB Erdoberfläche, CD obere Grenze), und von welchen nun die warme Masse durch die entstehende Bewegung gegen N in das Gebiet OP der Basis bis auf die Erdoberfläche herabgedrückt wird, während die kalte durch die Bewegung gegen S in einem Teil des Querschnittes gehoben werden muß. In dem Querschnitt innerhalb der Grenzlinien GN und HP liegt eine kalte Masse westlich, eine warme östlich; in dem nächsten Querschnitt innerhalb der Grenzlinien KO und MQ liegt eine warme Masse westlich, eine kalte östlich. Betrachten wir das Gebiet zwischen den senkrechten Linien GE und HF , dem nach W und nach E schematisch ganz die gleichen Gebiete auf einem Breitenkreise folgen, so bedeuten die vier Teile dieses Gebietes folgendes:

Teil I ($GEJK$): Kalte Masse (Dichte ρ), mit Geschwindigkeit v_1 nach S strömend. (Pfeil in der Richtung der y -Achse gegen Süden).

Teil II (KJO): Kalte Masse (Dichte ρ), mit Geschwindigkeit v_2 nach S strömend.

Teil III ($KOPH$): Warme Masse (Dichte ρ'), mit Geschwindigkeit v_3 nach N strömend.

Teil IV (HPF): Kalte Masse (Dichte ρ), mit Geschwindigkeit v_4 nach N strömend.

Es ist also nur Teil III mit warmer Masse besetzt, die anderen drei Teile mit kalter; sie bilden zusammen das Gebiet $GNOK$ oder $HPQM$ in der Figur, das schraffiert ist. Die gestrichelten starken Linien sind die Grenzflächen zwischen kalt und warm; und zwar KO und MQ die Grenzfläche in Tiefdruckgebieten, GN und HP in Hochdruckgebieten.

Wir berechnen nun die Druckverteilung und daraus die Lage der Oberflächen GK und KH und der Grenzflächen. Im Gebiet I sei der vertikale Abstand eines beliebigen Punktes der Linie GK von der Strecke AB mit z_1 bezeichnet, während x die Abszisse dieses Punktes vom Zentrum des Koordinatensystems E angibt. Dann ist der Druck an der Erdoberfläche AB in dem Gebiet I gegeben

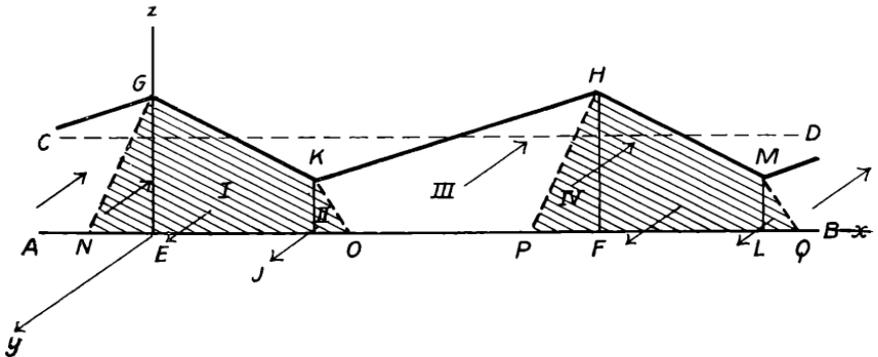


Fig. 13.

durch $p_1 = \rho g z_1$. Bei stationärer Bewegung ist $\frac{1}{\rho} \frac{dp_1}{dx} = -\lambda v_1$,

(wobei $\lambda = 2 \omega \sin \varphi$), somit $\frac{dz_1}{dx} = -\frac{\lambda}{g} v_1$. Hiemit ist der Winkel α

gegeben, den die Linie GK , also die Oberflächengrenze der kalten Masse, gegenüber dem Horizont (BA) bildet. Wir bezeichnen

$$-\frac{dz_1}{dx} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\lambda}{g} v_1.$$

Die Druckverteilung im Gebiet II auf der Strecke JO ist gegeben durch $p_2 = \rho' g (z_3 - z_2) + \rho g z_2$, wobei z_2 den Vertikalabstand der Punkte auf der Strecke KO , z_3 den der Punkte auf der Strecke KH von der Linie AB angibt. Im Gebiet III ist die Druckverteilung auf der Strecke OP gegeben durch $p_3 = \rho' g z_3$. Aus letzterer

Gleichung läßt sich zunächst $\frac{dz_3}{dx}$ berechnen, da in stationärem Zustand bei negativem Wert der Geschwindigkeit v_3 (nach N gerichtet)

$\frac{1}{\rho'} \frac{dp_3}{dx} = \lambda v_3$ ist. So ergibt sich $\frac{dz_3}{dx} = \frac{\lambda}{g} v_3 = \operatorname{tg} \gamma$, wobei γ

der Winkel zwischen der Strecke KH und dem Horizont AB ist. Im

Gebiet II herrscht südliche stationäre Strömung, so daß $\frac{1}{\rho} \frac{dp_2}{dx} = -\lambda v_2$

ist. Aus der obigen Gleichung für p_2 ergibt sich

$$\frac{dp_2}{dx} = \rho' g \frac{dz_3}{dx} + (\rho - \rho') \frac{dz_2}{dx} = -\rho \lambda v_2$$

und nach Einsetzen des Wertes $\frac{dz_3}{dx}$

$$-\frac{dz_2}{dx} = \frac{\lambda}{g} \frac{\rho v_2 + \rho' v_3}{\rho - \rho'} = \operatorname{tg} \beta.$$

Diese Formel gibt den bekannten Margules'schen Wert der Grenzflächenneigung, wobei β der Winkel zwischen KO und OJ . In dem Gebiet IV ist der Druck gegeben durch

$$p_4 = \rho g z_4 + \rho' g (z_3 - z_4),$$

wobei z_4 der Abstand der Punkte auf der Linie HP vom Horizont ist.

Aus $\frac{1}{\rho} \frac{dp_4}{dx} = \lambda v_4$ ergibt sich für die Neigung dieser zweiten

Grenzfläche $\frac{dz_4}{dx} = \frac{\lambda}{g} \frac{\rho v_4 - \rho' v_3}{\rho - \rho'} = \operatorname{tg} \delta$, wo δ der Winkel HPF ist.

Die Grenzfläche HP muß einen Keil kalter Luft unter warmer bilden, es muß also δ positiv und somit $\rho v_4 > \rho' v_3$ sein; d. h. die Geschwindigkeit v_4 ist im allgemeinen größer als v_3 .

Diese Bedingung stationärer Strömung ist auffallend. Es ist nicht genügend, daß eine warme Masse nach N und daneben eine kalte nach S strömt, es muß sogar noch ein Teil der kalten Masse, die aus Norden in den Gebieten I und II herabgekommen ist, im Gebiet IV wieder zurückströmen; sonst ist keine stationäre Grenzfläche auf der Westseite der Kaltströmung auffindbar. Diese aus der Theorie sich ergebende Bedingung wird durch Beobachtungen in der Natur bestätigt. Wo wir auf einer Wetterkarte einen Kältestrom aus N gegen S vordringen sehen, da findet sich immer auf der Westseite dieses Kältestromes eine Krümmung der Stromlinien über die Richtung W nach NW und N, also die Rückströmung eines Teiles der kalten Masse. Es besteht offenbar stets eine Annäherung an den stationären Bewegungszustand, wenn wir auch auf den Wetterkarten fast niemals unveränderte Strömungen beobachten.

Aus den vier Querschnitten Q der Gebiete I bis IV in Fig. 13 kann man feststellen, wie weit die warme Luft auf der rechten Seite der kalten herabsinkt, wenn ursprünglich die warme ganz über der kalten gelegen wäre, nämlich ohne Erdrotation oder am Äquator.

Als Zirkulationsbedingung ist anzunehmen, daß die in der Zeiteinheit nach Süden strömende Masse der nach Norden strömenden gleich ist. Berechnet man sonach

$$v_1 Q_1 \rho + v_2 Q_2 \rho = v_3 Q_3 \rho' + v_4 Q_4 \rho,$$

so ergibt sich mit Benützung der oben berechneten Winkelwerte eine absolute Identität dieser Strömungen.

Bezeichnet weiter l die Breite einer Zirkulation ($l = EF$) und h die ursprünglich gleichmäßige Höhe der oberen Grenze der warmen

Masse (Abstand zwischen CD und AB), so ist $lh = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$. Für einzelne Beispiele soll nun die Breite des warmen Streifens am Erdboden, d. h. $f = OP$, berechnet werden. Es ist ja klar, daß der Querschnitt III bei zunehmender Strömung oder Erdrotation aus der symmetrischen Lage oberhalb der Strecke EF nach Osten herabsinkt, zuerst mit einer Linie die Erdoberfläche erreicht und weiter eine breite Fläche derselben mit warmer Masse bedeckt. Hier frägt es sich nun, wie die Breite dieser warmen Strömung an der Erdoberfläche von der Windgeschwindigkeit abhängt. In Fig. 13 ist natürlich die vertikale Dimension gegenüber der horizontalen sehr stark vergrößert. Die Winkel der Grenzflächen und Oberflächen gegenüber dem Horizont sind sehr gering. Bezeichnen wir die Tangenten dieser Winkel, die oben berechnet wurden, mit $a = tg \alpha$, $b = tg \beta$, $c = tg \gamma$, $d = tg \delta$, so wird die Breite des warmen Streifens an der Erdoberfläche:

$$f = l \left[1 - \frac{c}{2(a+c)} \left(\frac{a+d}{d} + \frac{b-a}{b} \right) \right] - h \frac{b+d}{bd}.$$

Um einige Zahlenbeispiele zu erhalten, sei angenommen, daß $l = 8 \cdot 10^6 m = 8000 km$ ist. Damit ist die Breite einer Zirkulation, bestehend aus einem warmen und einem kalten Streifen, angegeben, wie sie im Abschnitt III dieser Arbeit berechnet wurde. Als Höhe h der ursprünglichen Zirkulationsmassen nehme ich keinen zu großen Wert an, weil hier mit Masse konstanter Dichte vereinfacht gerechnet ist, nicht mit Dichteabnahme nach aufwärts.

Sei z. B. die Geschwindigkeit

$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 = 10 m/s \text{ gegen S} \\ v_3 &= 10 m/s \text{ gegen N} \\ v_4 &= 15 m/s \text{ gegen N,} \end{aligned}$$

ferner die Temperatur der kalten Luft 280° , die der warmen 290° abs., so wird nach obigen Formeln, wo $\rho = \frac{p}{RT}$ eingesetzt wird

und $\frac{p}{R}$ entfällt, $a = 10^{-4}$, $b = 5 \cdot 7 \cdot 10^{-3}$, $c = 10^{-4}$, $d = 1 \cdot 55 \cdot 10^{-3}$;

hier ist die geographische Breite von 45° angenommen, also $\lambda = 10^{-4}$.

In diesem Fall wird

$$\begin{array}{ll} \text{bei } h = 1000 m & f = 3080 km \\ h = 2000 & f = 2260 \\ h = 3000 & f = 1440 \\ h = 4000 & f = 620 \end{array}$$

Je niedriger die Zirkulationsströmungen sind, um so breiter wird der warme Streifen an der Erdoberfläche. Bei den gegebenen Windgeschwindigkeiten wird, wenn $h = 5000 m$, die warme Strömung

überhaupt nicht mehr zur Erde herabreichen, sondern sich nur auf der Ostseite der kalten Strömung in dieselbe vertiefen.

Nehmen wir anderseits geringe Nordströmung und nicht die gleiche, sondern doppelt so große warme Südströmung an, dabei noch etwas größere kalte Südströmung (v_4), so ist zu erwarten, daß durch die rasche Südströmung der Querschnitt dieser Masse viel kleiner wird und wegen der nach oben breiteren Form der warmen Masse dieselbe nur unter ausnahmsweisen Verhältnissen den Erdboden berührt. Es sei also $v_1 = v_2 = 5 \text{ m/s}$, $v_3 = 10 \text{ m/s}$, $v_4 = 12 \text{ m/s}$; dann ist unter 45° Br.: $a = 5 \cdot 10^{-5}$, $b = 4 \cdot 25 \cdot 10^{-3}$, $c = 10^{-4}$, $d = 6 \cdot 8 \cdot 10^{-4}$ und man erhält für $h = 1460 \text{ m}$ den Wert $f = 0$. Für $h = 1000 \text{ m}$ wird $f = 800 \text{ km}$. Wäre $h = 2000 \text{ m}$, so würde der warme Streifen nicht bis zur Erde herabreichen, bei $h = 1460 \text{ m}$ stößt er mit der Verbindung der beiden Grenzflächen KO und HP gerade auf die Erdoberfläche. Bei $h = 1000 \text{ m}$ umfaßt die Breite der warmen Strömung nur ein Zehntel der gesamten Zirkulationsbreite; 7200 km bleiben für die Breite der kalten, langsamen Strömung übrig.

Nehmen wir analog zu dieser Geschwindigkeitsverteilung angenähert doppelt so große Werte von v in allen Gebieten an, also $v_1 = v_2 = 10 \text{ m/s}$, $v_3 = 20 \text{ m/s}$, $v_4 = 25 \text{ m/s}$, so wird $a = 10^{-4}$, $b = 8 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$, $c = 2 \cdot 10^{-4}$, $d = 1 \cdot 65 \cdot 10^{-3}$ und für $h = 2000 \text{ m}$ daraus $f = 1090 \text{ km}$. Die stärkere Strömung verursacht also hier gegen früher ein tieferes Herabsinken der warmen Masse, so daß an der Erdoberfläche noch bei $h = 2000 \text{ m}$ eine Warmströmung erscheint.

Noch mehr wird die warme Strömung herabgedrückt, wenn ihre Geschwindigkeit v_3 gegenüber v_1 und v_2 kleiner wird. Ist z. B. $v_1 = v_2 = 10 \text{ m/s}$, $v_3 = 5 \text{ m/s}$, $v_4 = 10 \text{ m/s}$, so wird $a = 10^{-4}$, $b = 4 \cdot 3 \cdot 10^{-3}$, $c = 5 \cdot 10^{-5}$, $d = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$ und für $h = 2000$ wird $f = 3480 \text{ km}$. Hier wird also der warme Streifen fast eben so groß wie der kalte (4520 km).

Nehmen wir die Geschwindigkeiten $v_1 = v_2 = 10 \text{ m/s}$, $v_4 = 15 \text{ m/s}$ an und setzen die Bedingung $f = 0$, so erhalten wir die Geschwindigkeit der warmen Strömung, die gerade mit einer Spitze die Erde berührt, zu $v_3 = 13 \text{ m/s}$. Die Länge f wird umso größer, je stärker die Strömung v_4 gegenüber v_3 ist, d. h. je größer der Winkel δ ist, und auch je größer der Winkel β . Außerdem hängt f von der Lage des Punktes K im Bereich zwischen EF ab. So haben alle vier Windarten Einfluß auf die Erscheinung.

In der Zyklonentheorie von Bjerknes wird das Abgeschnittenwerden einer warmen Strömung auf der Südostseite einer Zyklone durch die kalte Strömung aus NW als »Okklusion« bezeichnet, womit gemeint ist, daß das Abheben der warmen Luft vom Boden ein Ende der Zyklonenenergie bedeutet. Diese Auffassung stimmt mit der hier dargestellten insofern überein, als die höhere Lage der warmen Strömung eine geringere kinetische Energie

angibt, die daher weniger imstande ist, die Wirbelbewegungen an der Grenzfläche fortzusetzen.

Bei der angegebenen Verteilung der stationären Zirkulation liegt an der Erdoberfläche der tiefste Druck im Punkt O der Fig. 13, der höchste im Punkt F . Nach aufwärts verschiebt sich das Tiefdruckzentrum längs der Grenzlinie OK , das Hochdruckzentrum bleibt in der vertikalen Linie FH liegen. Je höher hinauf sonach die kalte Masse reicht, desto näher liegt im Niveau der Erdoberfläche das Tiefdruckzentrum dem Hochdruckzentrum im Osten und desto weiter entfernt vom Hochdruckzentrum im Westen. Hierüber sind aber noch keine Beobachtungen ausgeführt.

Zum Schlusse möchte ich noch darauf hinweisen, daß die Zirkulationsströmung, die unter einem gewissen Breitenkreis in stationärer Lage ist, wie sie eben dargestellt wurde, bei weiterer Bewegung in andere Breiten meist nicht stationär bleibt, d. h. daß gewöhnlich Beschleunigungen auftreten werden. Die meridionale

Strömung ist im stationären Zustand durch $2 \omega \sin \varphi v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$

gegeben. Wenn nun z. B. eine Luftmasse nach N strömt, so kommt sie in höhere Breite, $\sin \varphi$ wird dann größer und es müßte der geeignete höhere Druckgradient gegen W vorhanden sein, damit diese Gleichung weiter besteht; ist dies nicht der Fall, so tritt eine Beschleunigung gegen Osten auf, nach der allgemeinen Gleichung

$\frac{du}{dt} = 2 \omega \sin \varphi v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$ (Hier ist u die positive Geschwindigkeit

gegen E). Nehmen wir z. B. an, der Druckgradient gegen W sei in dem Meridian, durch welchen die Masse strömt, konstant, also unabhängig von der Breite, so ergibt sich aus obiger Gleichung $d\dot{u} + 2 \omega \cos \varphi v d\varphi = 0$.¹

Die Geschwindigkeit v , die wir in unserer Gleichung als positiv gegen S anzunehmen haben, ist gegeben durch $v = -r \frac{d\varphi}{dt}$ wo r der Erdradius. Durch Einsetzen dieses $d\varphi$ in obige Gleichung erhalten wir

$$d\dot{u} = 2 \omega \cos \varphi \frac{v^2}{r} dt \text{ und } \dot{u} = 2 \omega \cos \varphi \frac{v^2}{r} t + K.$$

Im Zeitbeginn ($t=0$) sei stationäre Bewegung vorhanden, also ist $K=0$, und wir erhalten die Beschleunigung

$$\dot{u} = 2 \omega \cos \varphi \frac{v^2}{r} t.$$

¹ $\dot{u} = \frac{du}{dt}$

Die Geschwindigkeit quer zum Meridian ergibt sich durch weitere Integration zu

$$u = \omega \cos \varphi \frac{v^2}{r} t^2,$$

wobei wieder für $t = 0$ keine Anfangskomponente u angenommen ist. Nehmen wir als Ausgangspunkt der Strömung $\varphi = 45^\circ$ an, als meridionale Geschwindigkeit z. B. $v = 10 \text{ m/s}$, so ergibt sich nach einem Tag eine Geschwindigkeit gegen Osten von $6 \cdot 2 \text{ m/s}$. Diese Ostbewegung erfolgt sowohl bei der Strömung gegen N als auch bei der gegen S; sie rührt daher, daß bei der Strömung gegen N die Ablenkungskraft stärker wird und sie die Masse nach Osten zieht, während bei der Strömung gegen S die Ablenkungskraft schwächer wird und der Druckgradient die Masse gegen Osten beschleunigt.

Die Bewegung in meridionaler Richtung ergibt den Weg vt , also bei 10 m/s in einem Tag 864 km , ungefähr 8° Breitenunterschied. Genau ist demnach diese einfache Rechnung nicht, weil die Breite φ sich während der Bewegung einer Masse ändert. Es hätte daher $\cos \varphi$ in der Integration nicht als konstant angenommen werden sollen. Berücksichtigt man dies, so erhält man durch Reihenentwicklung die Geschwindigkeit

$$u = \frac{\omega v^2 t^2}{r} \left[\cos \varphi_0 + \frac{v \sin \varphi_0}{r} \frac{t}{3} + \dots \right],$$

wobei unter φ_0 die Breite für $t = 0$ zu verstehen ist. Die Ausrechnung des zweiten Gliedes nach unserem Zahlenbeispiel gibt nur eine Vergrößerung des u -Wertes um 5% gegenüber dem früher berechneten Wert $u = 6 \cdot 2 \text{ m/s}$, der nach einem Tag entsteht.

Natürlich ist die Konstanz des Druckgradienten $\frac{\partial p}{\partial x}$ nur eine vereinfachte Annahme, die in Einzelercheinungen keine genaue Gültigkeit hat. Das Ergebnis der Rechnung deutet aber darauf hin, daß die warme Strömung, die ursprünglich gegen N gerichtet war, bald eine Komponente gegen E bekommt, daß also die warme Strömung normalerweise eine Ablenkung gegen NE erhält. Durch diese Ablenkung wird der Druckgradient nach W wegen des Absaugens von Masse gegen E verstärkt, es kann also wieder die stationäre Gleichung zur Geltung kommen, aber die Bewegungsrichtung ist nun etwas nach rechts gedreht. Bei der kalten Strömung aus N wird durch Beschleunigung der Masse gegen E der nach E gerichtete Druckgradient verringert, so daß auch dann, nach Entstehung einer südöstlichen Strömungsrichtung, wieder die stationäre Gleichung in Geltung kommen kann. Eine theoretische Berechnung dieser beiden Strömungen und ihrer Richtung ist noch nicht gelungen; nur sei im Anschluß an die vorläufige einfache Darstellung der Beschleunigung gegen E darauf hingewiesen, daß tatsächlich die

warmen Strömungen meist eine Ablenkung gegen Osten von der Richtung gegen den Pol zeigen und daß die kalten Strömungen ihre östlich liegenden Massen nach Abwanderung vom Polargebiet meist nach Osten befördern, während der westlich liegende Teil der kalten Strömung meist nach S oder auch nach SW und W weiterwandert. Die kalten Strömungen teilen sich sehr häufig in zwei Teile, nachdem sie das östlich liegende Zyklonenzentrum südwärts überschritten haben. Die warmen Strömungen teilen sich auch mitunter gegen NE und NW, wobei der letztere Teil die Zyklone im Osten umkreist. Diese Erscheinungen hängen außer der angegebenen Ursache, die in der Veränderung der Ablenkungskraft besteht, natürlich mit den Veränderungen des Druckgradienten zusammen. Wir müssen annehmen, daß zwischen der kalten Strömung im Westen und der warmen im Osten der tiefe Druck an der Grenzfläche durch Wirbelbildung (Turbulenz) und Zentrifugalkraft weiter erniedrigt wird, wodurch die Zyklone entsteht (Fig. 13, Linie OK). Umgekehrt kann an der Grenze der kalten Strömung im Osten und der warmen im Westen ein antizyklonaler Wirbel zustande kommen.

Der zyklonale Wirbel pflanzt sich längs der Grenzlinie der warmen und kalten Strömung fort, und zwar im allgemeinen in der Richtung der Warmströmung. Der Grund hiefür dürfte zum Teil darin liegen, daß die Wärmeströmung wegen der geringeren Reibung am Boden fast immer größere Geschwindigkeit hat als die kalte, wie schon oben erwähnt wurde, weiter darin, daß die warme Luft leichter ist als die kalte, so daß der Druck auf der Ostseite erniedrigt wird. Ob sich außerdem die Wirbelbewegung mit einer anderen Geschwindigkeit fortpflanzt als die Masse, wie es bei Wellenbewegung der Fall ist, scheint theoretisch noch nicht festgestellt zu sein; doch ist es nach den mitunter ganz großen Geschwindigkeiten der Zyklonenfortpflanzung sehr wahrscheinlich. Auch spricht die rasche Bewegung der Fall- und Steiggebiete des Druckes dafür. Die geringere Geschwindigkeit, mit der sich Antizyklonen gegenüber Zyklonen bewegen, wird in Zusammenhang stehen mit dem geringen Wert der Differenz von ablenkender Kraft und Zentrifugalkraft, die einander entgegengesetzt gerichtet sind, während bei den Zyklonen die Summe dieser gleichgerichteten Kräfte eine viel stärkere Wirkung ausübt. Bei stationärer Bewegung wird durch dieses Zusammenwirken der beiden Kräfte im innersten Gebiet der Zyklone die Gradientkraft sehr stark, in der Antizyklone durch die gegensätzliche Funktion derselben sehr schwach.

In einer früheren Arbeit¹ habe ich einen Versuch gezeigt, wo in einer rotierenden Wanne, deren Wasser am Rande erwärmt, im Zentrum abgekühlt wird, kalte und warme Strömungen vom und zum Zentrum entstehen und sich dabei Wirbel in zyklonaler sowie auch in antizyklonaler Richtung bilden. Diese Versuche sprechen für

¹ Bildung von Windhosen und Zyklonen; Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss., Abt. II a, 132. Bd., 1923.

die oben angegebenen Anschauungen; doch sind sie noch nicht genügend genau durchgeführt.

Wenn die Nordströmung auf ihrer Ostseite im allgemeinen eine Ablenkung gegen Osten und auch die Südströmung eine gegen Osten erfährt, so kommen komplizierte Strömungsvorgänge zustande, so die Tendenz zum Durchschneiden einer Strömung durch die andere, wie dies in den Karten 1—6 öfters erscheint. Bei dem nicht parallelen Verlauf zweier Strömungen kann es auch noch von Bedeutung sein, daß bei einer Konvergenz die Geschwindigkeiten erhöht werden und dadurch ein Druckfall eintritt, während bei Divergenz ein Druckanstieg durch Erniedrigung der Windstärke entsteht.

Eine genaue Untersuchung dieser Strömungsvorgänge fehlt noch, sowohl in theoretischer wie in praktischer Beziehung. Doch machen die anfangs erwähnten Erscheinungen den Eindruck, daß die stete Veränderlichkeit der Luftbewegung aus den Wärme- und Kältezufuhren stammt, die die Zirkulationen erzeugen; bei ihnen spielt vermutlich die Turbulenz und Vermischung der Massen eine sehr verwickelte Rolle. Erscheinungen, die man früher als Hauptursache annahm, wie Niederschlag und Verdunstung, dürften nur eine sekundäre Bedeutung haben. Natürlich hat die Lage der Kontinente und Ozeane auch großen Einfluß. Aber man kann wohl nach den Ergebnissen dieser Arbeit nicht annehmen, daß auf einer ganz gleichmäßigen Erdoberfläche die Veränderlichkeiten fehlen würden; es sind auch auf einer ganz symmetrischen Halbkugel vielfache Zirkulationen zu erwarten, die keine stetigen Formen haben. Für die Zukunft der Meteorologie dürfte sonach die Strömungsforschung die wichtigste Rolle spielen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften
mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1928

Band/Volume: [137_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Exner Felix Maria von

Artikel/Article: [Über die Zirkulationen kalter und warmer Luft zwischen hohen
und niedrigen Breiten. 189-225](#)