oben angegebenen Grenzen könnte hiernach ein Naturgesetz gelegentlich einmal weitgehend versagen, nur ist das Eintreten dieses Falles so überaus unwahrscheinlich, daß bei den praktischen Anwendungen (im allgemeinen wenigstens) nicht damit zu rechnen ist.

Die logische Operation mit absolut genauen Naturgesetzen als einer Abstraktion kann andererseits niemandem verwehrt werden, und daher darf man mit dem Prinzip der Kausalität in seiner strengsten Form ebenfalls logisch operieren, wenn man sich nur bewußt bleibt, daß man damit den Boden der Erfahrung verläßt und sich in das Gebiet rein spekulativen Denkens begibt.

Man hat den exakten Naturwissenschaften wohl den Vorwurf gemacht, daß sie die philosophische Forschung tyrannisiert hätten. Vielleicht ist zuzugeben, daß die bisher übliche Fassung des Kausalitätsprinzips als eines absolut strengen Naturgesetzes wie spanische Stiefel den Geist einschnürte, und es ist daher wohl gegenwärtig Pflicht der Naturforschung, diese Fesseln soweit zu lockern, daß der freie Schritt des philosophischen Denkens nicht mehr behindert wird.

Nachträglicher Zusatz. Der vorstehende Aufsatz ist, unter Weglassung der auf den speziellen Anlaß bezugnehmenden Einleitungs- und Schlußworte, ein wörtlicher Abdruck meiner beim Antritt des Rektorats in der Aula der Berliner Universität am 15. Oktober 1921 gehaltenen Festrede. — Nachträglich möchte ich noch folgenden Punkt schärfer betonen, als oben geschehen. Offenbar kommt es weniger darauf an, ob man das Prinzip der Kausalität als ein streng gültiges ansieht oder nicht, als vielmehr darauf, ob man die Naturprozesse als begreiflich auffaßt oder ob man den menschlichen Geist für unfähig hält, jene bis in die letzten Einzelheiten zu durchschauen. Z. B. halten die Lehren auch der meisten Religionen wohl daran fest, daß alle Ereignisse nach dem Willen einer höchsten Vernunft sich abspielen, also mit vollkommener Logik; was sich mit der Forderung des Kausalitätsprinzips deckt. Bis vor kurzem stand die Physik wohl allgemein auf dem Standpunkte, daß alle Ereignisse als logisch sich abspielend auch vom menschlichen Geiste — im Prinzip wenigstens — erkannt werden könnten, was die Lehren aller Religionen stets bestritten haben. Wenn also wirklich die gegenwärtig mehrfach, auch von uns oben besprochene Auffassung, wonach nur statistische Mittelwerte des Geschehens unserer naturwissenschaftlichen Erkenntnis zugänglich sind, sich als zu Recht bestehend erweisen sollte, so würde in der Tat ein gewiß auffallender, bisher kaum vorausgesehener Parallelismus zwischen theologischer und physikalischer Auffassung zu konstatieren sein.

Über die Polarfronttheorie nach Bjerknes und die neueren Anschauungen von den atmosphärischen Vorgängen.

Von Erich Kühlbrodt, Hamburg.

Eine der Hauptfragen in der Meteorologie ist die nach dem Wesen der Luftdruckdepressionen, welche in unseren Breiten die Veränderlichkeit des Wetters bedingen, die Frage nach dem Aufbau, Entstehen und Vergehen der Zyklonen. In

der letzten Zeit ist diese Kernfrage wieder lebhaft in Angriff genommen worden; sie führte zu einer Erörterung der Vorstellung von den atmosphärischen Vorgängen überhaupt. Der Anstoß hierzu ging von V. Bjerknes aus, dem früheren Direktor des Geophysikalischen Instituts in Leipzig, jetzt in gleicher Eigenschaft in Bergen, sowie von seinem Sohne J. Bjerknes und weiteren Mitarbeitern.

Bjerknes' Bestreben ging seit jeher dahin, in der synoptischen Meteorologie *sämtliche* meteorologischen Elemente vollständig in Betracht zu ziehen, weil nur so ein Fortschritt auf dem Gebiete der wissenschaftlichen Wettervorhersage möglich ist. Bisher wurde nur die Verteilung des Luftdrucks und der Lufttemperatur im Wetterdienst dargestellt, nicht aber der Wind. Bjerknes arbeitete deshalb zunächst Methoden aus zur Darstellung des Windfeldes (Stromlinien¹⁾). Bei der ausführlichen synoptischen Bearbeitung bestimmter Wetterlagen, für welche besonders zahlreiche Beobachtungen vorlagen, wurde diese Darstellung angewandt. Von vornherein zeigten nun die gezeichneten Stromlinienkarten Unstetigkeitslinien, längs welchen ein Einströmen bzw. Ausströmen stattfand. Die Verfolgung dieser Konvergenz- und Divergenzlinien — d. h. den Linien, zu denen *hin* die strömende Luft konvergiert und *von* denen *aus* sie divergiert — zeigte, daß deren Fortbewegung Gesetzmäßigkeiten unterworfen ist (1)²⁾. Bei der weiteren Nachprüfung ergab sich folgendes für die weitere Entwicklung der Anschauungen grundlegende Erfahrungsgesetz (2): Zu jeder Zyklone, welche nicht völlig örtlich feststeht, gehören zwei charakteristische Konvergenzlinien. Beide kommen von der rechten Seite der Zyklonenbahn; die eine fast senkrecht zur Zyklonenbahn, die andere sich um so dichter an die Zyklonenbahn anschmiegend, je mehr sie sich dem Zentrum der Zyklone nähert, woselbst beide Linien zusammenlaufen. Die erstere ist die „Böenlinie“, identisch mit der bereits früher bekannten, die letztere wurde „Kurslinie“ genannt, weil sie durch ihre Tangente im Zyklonenmittelpunkt die augenblickliche Fortschreitungsrichtung der Depression anzeigt.

Diese Tatsache, daß also jede Zyklone zwei ausgezeichnete Einströmungslinien besitzt, führte zu einer neuen Vorstellung vom Aufbau bewegter Zyklonen (3), allgemein vom Zustand der Atmosphäre, wenn Niederschlag fällt (4, 7), und weiterhin zur Vorstellung einer „Polarfront“ (5) und deren Rolle bei den Witterungsvorgängen der gemäßigten Breiten sowie in der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation überhaupt (6).

Im folgenden seien diese Anschauungen im Zusammenhang dargestellt. Fig. 1 (oben) zeigt

¹⁾ Eine Stromlinie ist dadurch charakterisiert, daß sie in jedem ihrer Punkte tangential zu der dort herrschenden Stromrichtung verläuft.

²⁾ Die eingeklammerten Zahlen weisen auf das Literaturverzeichnis am Schlusse dieses Aufsatzes hin.

den Grundriß einer bewegten Zyklone. Die Darstellung ist schematisch und idealisiert; in Wirklichkeit werden die Verhältnisse stets mehr oder weniger Abweichung zeigen. Die beiden oben genannten Unstetigkeitslinien treten deutlich hervor. Die Stromlinien erleiden hier einen Knick, dessen Schärfe mit Entfernung vom Zentrum abnimmt, d. h. längs diesen Linien herrscht ein mehr oder weniger ausgesprochener Windsprung.

Nur in einem örtlich feststehenden Felde können die beiden Linien symmetrische, doppelseitige Konvergenz zeigen; da in unserm Falle das Feld der Fortschreitungsbewegung überlagert ist, so ist nur Windsprung möglich, der aber eben besagt, daß hier ein Einströmen stattfindet. Den eigentlichen Charakter einer Stromlinie (s. Fußnote auf S. 495) haben die beiden Konvergenzlinien hierdurch verloren. Sie sind nun aber

Grundriß einer bewegten Zyklone. Die starke Linie — im linken Teil kalte Front (Böenlinie), im rechten Teil warme Front (Kurslinie) — ist die Schnittlinie der schräg nach oben ansteigenden Diskontinuitätsfläche mit der Erdoberfläche. Die asymmetrische Form der Zyklone ist deutlich erkennbar.

Vertikalschnitt (in etwas verändertem Maßstabe) durch die Zyklone längs der im Grundriß angedeuteten Graden $Q_1 Q_1$ nördlich des Zentrums.

Vertikalschnitt (in etwas verändertem Maßstabe) durch die Zyklone längs der im Grundriß angedeuteten Graden $Q_2 Q_2$ südlich des Zentrums.

ci = cirrus
ci-str = cirro-stratus
a-str = alto-stratus
a-cu = alto-cumulus
ni = nimbus

Fig. 1. Aufbau einer fortschreitenden Zyklone nach Bjerknes.

nicht nur dynamische, sondern auch thermische Unstetigkeitslinien: sie schließen gegenüber dem sonst kalten Teil der Zyklone einen „warmen Sektor“ ab. Die Kurslinie ist die Front einer fortschreitenden warmen Luftmasse, die Böenlinie die Front einer fortschreitenden kalten Luftmasse. (Die warme Luft ist in den Figuren durch doppelte Stromlinien angedeutet.) Es hat sich gezeigt, daß die Kurslinie nur in unmittelbarer Nähe des Zyklonenmittelpunktes wirklich tangential zur Zyklonenbahn verläuft. Hier in diesem letzten kurzen Stück ist die Lage der Linie aber nicht mehr mit Sicherheit anzugeben, so daß die Kurslinie ihrer ursprünglich erhofften wichtigen Bedeutung, nämlich daß sie den Kurs der Zyklone anzugeben erlaubt, leider nicht gerecht wird. Die Bezeichnungen Kurs- und Böenlinie wurden daher in den jüngsten Veröffentlichungen fallengelassen und durch „*warme Front*“ und „*kalte Front*“ ersetzt, wodurch, wie sogleich erhellen wird, die eigentliche Bedeutung der beiden Linien charakterisiert wird.

Vor der warmen Front befindet sich eine weite Fläche mit Wolkenbedeckung sowie ein breites Niederschlagsband, hinter der kalten Front ein schmales Wolken- und Niederschlagsband. Fig. 1 unten zeigt in etwas verändertem Maßstabe schematisch zwei Vertikalschnitte durch die Zyklone längs den im Grundriß angedeuteten Querschnitten Q_1Q_1 nördlich des Zentrums und Q_2Q_2 südlich des Zentrums. Betrachten wir zuerst Q_2Q_2 , so sehen wir, daß von der warmen Front aus unter sehr flachem Winkel gegen die Erdoberfläche eine Unstetigkeitsfläche (früher Kursfläche genannt) in die Höhe steigt. Sie trennt einen kalten Luftkeil unten von der warmen Luft darüber; sie bildet eine Gleitfläche, längs welcher die warme, also leichtere, Luft aus dem warmen Sektor hinaufweht über den Keil der unteren kalten, also schwereren Luftmasse. Während hier die warme Luft infolge ihrer eigenen Bewegung hinaufgleitet und den kalten Luftkeil beiseite fegt, ist es an der kalten Front umgekehrt. Hier erhebt sich eine Diskontinuitätsfläche aufwärts, welche einen kalten Luftkeil nach oben begrenzt, der auf Grund seiner eigenen Bewegung die warme Luft vor sich hertreibt. Während die Gleitfläche an der warmen Front unter einem sehr kleinen Winkel sacht ansteigt, kann die Trennungsfläche an der kalten Front (früher Böenfläche genannt) bei starker Ausprägung der Gegensätze eine in Gestalt eines sich vorwärts stürzenden „Böenkopfes“ steil aufgewölbte Form annehmen. An dieser Vorderfront wird die warme Luft, die nicht schnell genug ausweichen kann, gewaltsam in die Höhe gedrängt. An der warmen wie an der kalten Front hat die warme Luft also eine Bewegungskomponente vertikal nach oben, daher hier die Konvergenz der Stromlinien am Boden. Hieraus ergibt sich die Wolken- und Niederschlagsverteilung. Luft, welche aufsteigt und sich in-

folgedessen durch Ausdehnung abkühlt, kondensiert; dieser Vorgang ist ja die überwiegende Ursache der Wolken- und Niederschlagsbildung. Bekannt ist die Erzeugung des Geländeregens an der Luvseite von Gebirgen, an welcher die heranwehenden Luftmassen zum Aufsteigen gezwungen werden. Ganz ähnlich ist der Vorgang in der Zyklone beim Hinaufströmen der warmen feuchten Luft an dem bis in große Höhen hinaufragenden Kaltluftkeil. Die Gleitfläche wird zur unteren Grenze einer weit ausgedehnten, den größten Teil der Troposphäre (Wolkenzone) in kontinuierlichem Übergange schräg durchsetzenden Wolkenfläche, deren unterer Teil Niederschlag aussendet. Diese Wolken, die wir von unten sehen, sind gewissermaßen die Nebelmassen in den verschiedensten Höhen am Hange des durchsichtigen Kaltluftgebirges. Am Vorderrand der kalten Front muß durch das hier stattfindende meist heftige Aufsteigen der warmen Luft Wolkenbildung meist mit größerer vertikaler Erstreckung und erheblichem Niederschlag auftreten.

An einem Orte, über welchen die Zyklone längs des Querschnitts Q_2Q_2 von rechts nach links hinwegzieht, wird sich also etwa folgender mit der Erfahrung übereinstimmender Wettervorgang abspielen: Hohe Federwolken (cirrus) leiten die Zyklone ein. Sie verdichten sich zu hohen Schichtwolken (cirro-stratus), die ihrerseits allmählich übergehen zu dickeren mittleren Schichtwolken (alto-stratus). Die Wolken werden schließlich immer dunkler und bilden sich in immer geringerer Höhe (nimbus), bis Regen einsetzt, welcher allmählich immer heftiger wird. Dann hört der Regen ziemlich rasch auf, die Wolkendecke bricht auf. Der Wind, bis dahin etwa südöstlich, dreht rasch nach SW herum, und die Temperatur nimmt zu (Vorübergang der warmen Front). Darauf herrscht wechselndes, ziemlich heiteres und abgesehen von Schauern und Geländeregen, beides lokaler Natur, trockenes Wetter (warmer Sektor). Dann aber bilden sich in der Höhe neue Wolken, grobe Schäfchen (alto-cumulus), und ihnen folgt eine Front dicker Wolkenballen, walzenförmige Böenwolken, die zu Gewitterwolken auswachsen können (cumulo-nimbus) und aus welchen heftige Regenschauer niederprasseln. Mit letzteren dreht der Wind plötzlich nach rechts (W und NW), die Windstärke wächst rasch an mit kräftigen Böenstößen, und die Temperatur fällt (Vorüberzug der kalten Front). Verhältnismäßig schnell klart der Himmel aber wieder auf, und nur noch vereinzelt kommen aus zerrissenen Haufenwolken Regenschauer hernieder.

Wie das Wetter sich für einen Beobachter nördlich des Zyklonenzentrums abspielt, ist aus dem Vertikalschnitt Q_1Q_1 in Fig. 1 leicht ersichtlich. Hier tritt nur einmal Regen ein, und zwar für die Zeit, während welcher der Zyklonenmittelpunkt am nächsten war. Dieser Regen hat den Charakter des Niederschlags an der warmen

Front. Es geht jedoch über den Beobachter keine warme oder kalte Front hinweg, die Temperatur bleibt bei östlichen oder nördlichen Winden niedrig. Die warme Luft fließt in der Höhe, von unten durch die Wolkenbildung zu erkennen. Die untere Wolkengrenze fällt wieder mit der Gleitfläche zusammen. Diese hat die Form einer flachen, vom Zyklonenzentrum nach N zu ansteigenden Mulde, welche den warmen Luftstrom aufwärts führt über die darunterliegende kalte Luft.

Die Zyklone hat also einen *asymmetrischen* Bau³⁾. Sie wird durchsetzt von einer Diskontinuitätsfläche, welche den Erdboden längs der warmen und kalten Front schneidet und, unter flachem Winkel aufwärts steigt. Die Fläche trennt verschieden bewegte und temperierte Luftmassen voneinander. Mischung findet wegen der Langsamkeit des Mischungsvorganges nur sehr wenig statt; die Trennungsfläche kann daher lange Zeit (Tage oder Wochen) fortbestehen⁴⁾. *Bjerknes* nimmt, wie oben ausgeführt, an, daß die Fläche sich bis in den oberen Teil der Troposphäre fortsetzt. Die Frage der Höhererstreckung kann jedoch erst beantwortet werden, wenn genügend zahlreiche aerologische Beobachtungen vorliegen. Das in Fig. 2 abgebildete, für die Unterrichtsammlung der Deutschen Seewarte angefertigte Modell zeigt schematisch die Mechanik der asymmetrischen Zyklone. Die Diskontinuitätsfläche ist hier durch Gaze markiert. In der Höhe besteht über der Zyklone eine einheitliche Westströmung, welche das ganze System mit sich fortbewegt.

Bei der Untersuchung genauer, ins einzelne gehender Wetterkarten fand *Bjerknes*, daß die Diskontinuitätslinien der Zyklone sich auch außerhalb des eigentlichen Depressionsbereiches fortsetzen: Es geht die kalte Front der einen Zyklone über in die warme Front der nächstfolgenden. Die von Zyklone zu Zyklone führende Unstetigkeitslinie nannte *Bjerknes* die *Polarfront*. Fig. 3 zeigt nach ihm den Verlauf der Polarfront

³⁾ Vergleiche die später hierüber folgenden historischen Ausführungen. Früher wurde, unter dem Einfluß der Konvektionstheorie von *Ferrel*, lange Zeit angenommen, daß die Zyklone symmetrischen Bau hätte mit gleichmäßigen Temperaturverhältnissen und Stromlinien mit stetigem Verlauf in Form von symmetrischen Spiralen zum Zentrum hin, wie es die Figur zeigt.

⁴⁾ Die Unstetigkeitsfläche ist, wie schon betont, ein idealisierter Begriff. In Wirklichkeit ist hier eine Schicht von endlicher Dicke vorhanden, in welcher eine mehr oder weniger rasche, aber stetige Änderung der meteorologischen Elemente vor sich geht.

am 31. XII. 1907 auf der durch das Dänische Meteorologische Institut gemeinsam mit der Deutschen Seewarte herausgegebenen großen synoptischen Wetterkarte, welche den Nordatlantischen Ozean und die anliegenden Kontinente umfaßt. Die Polarfront schlägt hier im wesentlichen drei große Wellen, welchen drei Depressionen entsprechen, über Nordamerika, dem Nordatlantik südlich Island und über Rußland. Die erstere Welle konnte auf den folgenden Wetterkarten deutlich auf ihrem Wege über den Ozean verfolgt werden; sie erreichte, überall die entsprechenden Witterungsvorgänge auslösend, die norwegische Küste fünf Tage später. Der Verlauf der Polarfront ergibt sich auf Grund der oben geschilderten Eigenschaften, aus dem Verlauf der Stromlinien, der Verteilung der Lufttemperatur, der Lage der Niederschlagsstreifen. Wenn auch von der anderen Erdhälfte ausreichende meteorologische Beobachtungen vorlägen, könnte die Front als geschlossene Linie rund um die Erde verfolgt werden. — Sie erhielt die Bezeichnung *Polarfront*, weil sie die Luft polaren Ursprungs im Norden mit verhältnismäßig tiefer Temperatur, großer Trockenheit, guter Sicht und vorherrschender Bewegung aus N und O begrenzt gegen die Luft äquatorialen Ursprungs, welche durch relativ hohe Temperatur, größeren Feuchtigkeitsgehalt, Dunst und vorherrschende Bewegung aus W und S gekennzeichnet ist. Die Polarfront stellt die Schnittlinie einer Grenzfläche mit dem Erdboden dar, welche von hier unter kleinem Winkel nach N zu in die Höhe steigt und die beiden eben charakterisierten verschiedenen Luftmassen voneinander trennt. Die Unstetigkeitsfläche, welche die polare Luftmasse wie eine bewegliche Haut einschließt, definiert durch ihre Schnittlinie mit dem Erdboden die Polarfront.

Bjerknes stellt nun die *Wellentheorie der Zyklonen* auf, als neue Theorie über die Entstehung dieser wichtigen Gebilde. Die Zyklonen entstehen durch Wellenschlagen der großen Unstetigkeitsfläche. Die einzelnen großen und kleinen Wellen der *Polargrenzfläche* sind die Zyklonen verschiedenen Stärkegrades. Die Polargrenzfläche befindet sich im allgemeinen in wellenförmiger, von W nach O fortschreitender Bewegung, also auch die Polarfront, die mit dieser Bewegung die gemäßigten Zone überstreicht und hier die atmosphärischen Zustände hervorruft, welche unser Wetter ausmachen. Je gewellter die Polargrenzfläche, also auch die Polarfront, desto veränderlicher und stürmischer das Wetter. Längs der Polarfront haben wir die größten Wettergegensätze, die stärksten Winde, die plötzlichen Windsprünge, die raschen Temperaturänderungen; längs dieser Linie geht die Bildung von Nebel, Wolken, Niederschlag vor sich. — Natürlich umfaßt, wie bereits hervorgehoben, die Polarfront nicht alle Niederschlagsgebiete, sondern nur die ausgedehnten mit ihr wandernden Regen-

Fig. 2. Modell einer asymmetrischen Zyklone.

Dem Modell liegt der Grundriß der Zyklone nach Fig. 1 (oben) zu Grunde. Die Gazeffläche stellt die Unstetigkeitsfläche dar, sie schneidet das den Erdboden vorstellende Brett in der (Fig. 1, oben, stark ausgezogen) Böenlinie — Kurslinie. Die Stromlinien an der Grundfläche des Modells verlaufen ganz entsprechend wie dort. Es befinden sich aber in dem räumlichen Modell außerdem noch die Stromlinien in der Höhe, in *verschiedener* Höhe verlaufend (daher das scheinbare Kreuzen). Beim Betrachten der Streben kommt das zum Ausdruck. Die Stromlinien vor und über der Gaze (warme Luft) verlaufen im rechten Teil des Modells die schräge Gazeffläche hinauf (vgl. Fig. 1 Querschnitt $Q_2 Q_2$ rechts). Die Stromlinien unter der Gaze (kalte Luft) sind weiß aufgehellt.

Fig. 3. Verlauf der Polarfront am 31. Dezember 1907 nach Bjerknes. Die Zahlen bedeuten Temperaturen, die schraffierten Streifen die mit der Polarfront sich verschiebenden Niederschlagsgebiete.

bänder. Die sehr wichtigen Regen lokaler Natur (orographischen Regen) treten unabhängig von ihr auf.

Fig. 4 zeigt rein schematisch die gewellte Polarfront. Da, wo eine warme Zunge sich neben einer kalten befindet, liegen die Zyklonen (T); das Zyklonenzentrum liegt, wie oben ausgeführt, an der Spitze der warmen Zunge. Die großen vorspringenden Zungen polarer Luft stellen die Gebiete höheren Luftdrucks dar, die Antizyklo-

nen (H), verknüpft mit heiterem Strahlungswetter. Die Zyklonenwellen können verschiedene Größe und Gestalt haben; das Lebensalter, die Beeinflussung durch die Beschaffenheit der Unterlage ändern die Form während des Zuges. Die regelmäßige typische Form wird die Zyklone bei flacher Unterlage besitzen, also besonders über dem Ozean; beim „Branden“ über unebenen Kontinenten aber wird sie sehr deformiert werden. In Fig. 4 sind verschiedene Depressionsstadien

K. Dove die Windströmungen in den Vordergrund und legte der Witterung den „Kampf“ zwischen polaren und äquatorialen Strömungen zugrunde, allerdings in Verquickung mit wesentlichen Irrtümern. Helmholtz leitete 1888 das Bestehen einer Gleitfläche in der Atmosphäre ab aus theoretischen Überlegungen über die Bedingungen, unter welchen eine kalte Luftmasse neben einer warmen bestehen kann. Margules führte diese Theorie fort unter Zugrundelegung des gesetzmäßigen Zusammenhangs zwischen den Geschwindigkeits- und Temperaturgegensätzen zweier Luftmassen mit dem Neigungswinkel der entstehenden Grenzfläche. Bei den nahe der Erdoberfläche vorkommenden Wind- und Temperaturunterschieden ist dieser Keilwinkel sehr klein (meist Bruchteile eines Grades). Das Bestehen einer nach Norden zu allmählich ansteigenden Grenzfläche zwischen der kalten Polarluft mit Ostwinden und den warmen Westwinden der gemäßigten Breiten entspricht der Theorie. Margules hat auch gezeigt, daß beim Vorstoßen kalter Luft, also dem Sinken kalter Luft unter Hebung warmer, die potentielle Energie der gesamten Luftmasse vermindert wird und dementsprechend lebendige Kräfte frei werden, welche sich (längs der kalten Front) als Stürme äußern. Der Amerikaner Bigelow hat in seiner „Gegenstromtheorie“ auf die große Bedeutung des Nebeneinanderliegens von kalten und warmen Luftströmungen in bezug auf die Entstehung der Depressionen der höheren Breiten hingewiesen und festgestellt, daß die Zyklonen ein wichtiges Glied der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation darstellen. H. Ficker hat die Kälte- und Wärmewellen untersucht; seine „Isochronen“ gleichzeitigen Eintretens starker Erwärmung bzw. Erkaltung fallen mit den warmen bzw. kalten Fronten von Bjerknes zusammen. Die Ausbreitung einer kalten Luftmasse und die Fortpflanzung von Kältezungen auf der Rückseite einer Depression hat F. M. Exner näher untersucht. Die Ergebnisse der oben erwähnten Meteorologen bezüglich der asymmetrischen Natur der Zyklonen hat Exner zusammenfassend bearbeitet, wobei er feststellen kann, daß sie mit denen von Bjerknes im wesentlichen übereinstimmen (9). Übrigens hat auch der englische Meteorologe N. Shaw bereits früher ein Schema einer asymmetrischen Zyklone entworfen, das mit dem Bjerknesschen Grundriß Ähnlichkeit hat. Bjerknes geht jedoch weiter, einerseits durch die genauere Betrachtung der meteorologischen Vorgänge in den Zyklonen, besonders der Kondensationserscheinungen, andererseits durch die bestimmtere Fassung auf Grund der Polarfront.

Allerdings bleibt Bjerknes noch die Aufgabe, die Wellentheorie der Zyklonen theoretisch zu begründen⁶⁾. Exner haben seine Untersuchungen

dahin geführt, die Entstehungsursache der Zyklonen anders aufzufassen als Bjerknes. Das Vordringen der Polargrenzfläche infolge Anhäufung kalter Luft in der Polarkalotte geschieht nicht gleichmäßig und in symmetrischer Anordnung zur Erdachse, sondern wird in sehr verwickelter Weise beeinflusst durch Hemmung der Bewegung an der Erdoberfläche und durch die infolge der ungleichen Verteilung von Wasser und Land vorhandenen Temperaturanomalien. An gewissen Stellen der Erde erleidet so die Grenzfläche erhebliche Ausbuchtungen. In der Gegend von Grönland wird sie z. B. stark nach Süden vorgedrückt werden, im Gebiet des Golfstroms aber eine bedeutende Ausbuchtung nach Norden haben. Unter solchen Umständen können die warmen Westwinde die kalte Luftmasse nicht überall im Gleichgewicht halten, besonders an den vorstoßenden Kältezungen stimmt der vorhandene Keilwinkel nicht mehr mit den vorhandenen Temperatur- und Geschwindigkeitsgegensätzen überein, so daß die Gleichgewichtsbedingung gestört ist. Die Grenzfläche wird durchbrochen, die kalte Luftmasse fließt, ihrem größeren spezifischen Gewicht folgend, unter die warme. Die kalte Luft hat hierbei eine sehr selbständige Bewegung, ihre Ausbreitung ist primäre und wesentliche Ursache für die Wettergestaltung. Die Entstehung der Zyklone ist auf das unter Ablenkung durch die Umdrehung der Erde vor sich gehende Übereinandersetzen der ursprünglich nebeneinanderliegenden warmen und kalten Luftmassen zurückzuführen; hierin stimmt Exner mit Bjerknes überein. Exner glaubt jedoch, daß die Zyklonen nicht periodische Wellen an der stabilen Polargrenzfläche sind, sondern daß sie an das selbständige, mehr oder weniger periodische Auftreten von Kälteeinbrüchen geknüpft sind, welche letzteren Vorgang man mit der Bildung von Tropfen beim Ausfluß aus einem Gefäß vergleichen kann.

An sich kommt die Wellentheorie der Zyklonen unseren Anschauungen sehr entgegen. Die Luftdruckregistrierung zeigt ja deutlich das wellenförmige, wenn auch nicht streng periodische Auftreten der wandernden Depressionen. Wie A. Wegener zeigte, begegnet aber die Auffassung, daß es sich um Schwingungen der Polargrenzfläche selbst handelt im Sinne von Helmholtzschen Luftwogen, schwerwiegenden Bedenken (10). Aus der Helmholtzschen Theorie der Wellen an Unstetigkeitsflächen folgt, daß die Wellenlänge um so größer wird, je kleiner der Temperatursprung (Dichtesprung) ist. Die aus der Erscheinung der Wogenwolken an atmosphärischen Inversionsflächen bekannten Wellenlängen (am häufigsten etwa 400–500 m) stehen mit dem aus der Theorie hierfür geforderten Temperatursprung in Übereinstimmung. Größere Wellenlängen von 1–2 km kommen nur selten vor, und hierfür ist schon ein recht kleiner Temperatursprung Bedingung, wie er durch die unver-

⁶⁾ Eine theoretische Arbeit von V. Bjerknes hierüber ist bereits angekündigt.

meidlichen Störungen leicht unwirksam gemacht wird. Diese Verhältnisse lassen es bedenklich erscheinen, die rund tausendmal längeren Zyklonenwellen als Helmholtzsche Luftwögen zu betrachten. Es erscheint allgemein nicht angängig, anzunehmen, daß eine Zyklone mit einem Durchmesser von etwa 2000 km und einer Höhe von höchstens 10 km, welche sich notwendigerweise über Räume mit recht verschiedenen Temperaturen erstreckt, durch den Betrag einer sehr geringfügigen, vielleicht 1—2° betragenden Temperaturinversion merkbar beeinflußt werden kann, daß sie als Helmholtzsche Welle lediglich eine Schwingung dieser Inversionsfläche um ihre Gleichgewichtslage darstellen soll. A. Wegener betont ferner, daß die Erklärung der Zyklone unserer Breiten auch die des tropischen Zyklons umfassen muß. Es spricht aber alles dagegen, daß bei den tropischen Zyklonen Temperaturunterschiede vorhanden sind und bei der langsamen Wanderung und schnellen Umdrehung (Durchmischung) vorhanden sein können. Wegener glaubt daher, ohne indes die Frage für spruchreif zu halten, daß die Entstehung der Zyklonen nicht auf thermische Gegensätze zurückzuführen ist, sondern daß die Zyklonen anderen dynamischen Charakters sind, Gebilde ähnlich den aus der Hydrodynamik in homogenen Strömungen bekannten Wellen- und Wirbelvorgängen. Die Wellentheorie der Zyklonen an sich bleibt unter diesem Gesichtspunkt in voller Bedeutung erhalten. Die im einzelnen vorhandene thermische und dynamische Struktur der Zyklonen wird ebenfalls in ihrer Bedeutung für die Witterungserscheinungen hierdurch nicht geschmälert; aber sie ist nicht mehr physikalische Ursache der Zyklonenentstehung, sondern *Begleiterscheinung*.

Eine Frage, welche weiter der Klärung bedarf, ist die, wie sich die *hohen* Zyklonen und Antizyklonen in die obigen Anschauungen einpassen. Das geschilderte Zyklonenmodell bezieht sich zunächst nur auf die niedrigen bewegten Zyklonen, welche auf die unteren Schichten beschränkt sind. Bjerknes nimmt zwar an, daß die Gleitflächen durch die ganze Troposphäre bis an die Grenze der Stratosphäre hinaufreichen. Das ist jedoch fraglich. Man kennt bisher keinen Fall direkter Messung, daß eine Inversion die Troposphäre vom Boden bis zum Cirrusniveau durchsetzt hätte; nennenswerte Inversionen über 4 km Höhe sind bisher noch nicht gefunden worden. Es sind ferner bei hohen Depressionen Fälle bekannt, wo die Druckregistrierung nicht der thermischen Anschauung entsprach, wo sogar eine Kältewelle nicht mit steigendem, sondern mit fallendem Druck verbunden war. Es müssen sich hier also in der Höhe ausgleichende, ja überkompensierende Vorgänge geltend machen. Das Wesen solcher „zusammengesetzten“ Gebilde, mit welchen sich besonders H. Ficker beschäftigt hat, ist noch nicht genügend bekannt. Exner glaubt, daß bei den hohen Luftdruckgebilden der obere

Teil symmetrischen Bau hat und erst darunter die Erscheinung der Asymmetrie auftritt und langsam gegen den Boden zunimmt.

Die theoretischen Erörterungen sind also noch voll im Fluß. Die Aufgabe ist, festzustellen, inwieweit bei der Entstehung der Depressionen *thermische*, inwieweit *mechanische* Ursachen maßgebend sind und wo die Grenze zwischen beiden liegt.

Durch die Anwendung des ganzen durch „Polarfront“ gekennzeichneten Anschauungskomplexes wird in der praktischen Meteorologie zweifellos ein großer Fortschritt erzielt werden. Es ist bereits mehrfach von Meteorologen, welche die neue Methode heranziehen, betont worden, wie sehr diese das Auge des Prognostikers für die einzelnen Witterungszustände und -vorgänge schärft. Es ist jedoch nicht zu verhehlen, daß jedenfalls einstweilen noch der allgemeinen Anwendung im Wetterdienst zum Teil erhebliche Schwierigkeiten entgegenstehen. Über See, wo ungestörte Verhältnisse vorliegen, ist die Diagnose der Polarfront noch am ehesten möglich. Sie würde hier noch gefördert werden, wenn neben den Beobachtungen der Lufttemperatur auch gleichzeitig solche der Oberflächentemperatur des Wassers in genügender Zahl vorlägen; denn die Differenz beider Werte läßt einen guten Schluß auf die Herkunft der Luft (polare oder tropische) zu. Allgemein wird der Verlauf der Polarfront in der Nähe der eigentlichen Zyklonenbahn, wo die Unstetigkeiten in den meteorologischen Elementen mit stärkerer Ausprägung auftreten, besser festzustellen sein, also besonders in höheren Breiten. Wir in Deutschland bekommen häufig nur das Ende der warmen und kalten Front zu spüren, wo die Gegensätze schon schwach und verwischt sind. Auf dem unebenen Kontinent treten zudem Hemmungs- und Brandungsvorgänge auf, welche die Polarfront stark verwickelt gestalten können. Dann sind hier die Beobachtungen durch *lokale* Besonderheiten, durch Strahlungsvorgänge, Abkühlung durch Regen usw. stark beeinflußt, so daß sich die Verhältnisse in den Bodenschichten geradezu umkehren können. Vorgänge sekundärer (lokaler) Natur überlagern die rein zyklonischen und machen letztere schwer erkennbar. Bei der vielfach gestörten Zyklone kann sich sowohl auf der Vorder- wie Rückseite eine größere Zahl von Frontstücken entwickeln (entsprechend den Randdepressionen), welche auf das Wetter von großem Einfluß sind, aber nicht in das Polarfrontschema eingepaßt werden können. Diese Tatsache hat wohl auch Wenger veranlaßt, sein komplizierteres Schema mit „falschen“ Fronten aufzustellen, welches allerdings der theoretischen Behandlung größere Schwierigkeiten als das von Bjerknes entgegengesetzt. Ein wesentlicher Fortschritt in der Diagnose der Wetterlage und damit in der Prognose würde zweifellos erzielt werden, wenn

Beobachtungen aus einer vom Boden nicht mehr beeinflussten Höhe in ausreichender Anzahl vorhanden wären. Die Forderung nach Vermehrung der aerologischen Warten ergibt sich aus diesen praktischen Gründen ebenso wie aus Gründen des Fortschritts der Theorie. Das Endziel wäre: aus der durch die aerologischen Aufstiegsresultate erlangten Kenntnis der Höhenlagen der thermischen und dynamischen Inversionen den räumlichen Verlauf der Grenzflächen für bestimmte Termine in Form von Isohypsenkarten festzulegen. Auch das Netz der Bodenbeobachtungsstationen, wie es heute für den täglichen Wetterdienst vorliegt, reicht noch nicht aus. Es ist dem Ausschnitt nach nicht umfangreich genug, um in allen Fällen die Polarfront in einer ausreichenden Länge zu erfassen, was nötig ist, um ihre Vorgeschichte und die daraus sich ergebende, für die Prognose grundlegende Änderungstendenz zu erkennen. Andererseits ist das Beobachtungsnetz für viele Fälle zu weitmaschig, um den Frontverlauf einwandfrei festlegen zu können. Besonders zweckmäßig wäre für den Wetterdienst auf Grund der Überwachung der Polarfront eine Organisation: „Weltwetteramt, Reichswetteramt, Bezirkswetteramt“, wobei diese in gegenseitiger Unterstützung auf Grund des für den zuständigen Bereich vorhandenen Beobachtungsmaterials in der obigen Reihenfolge zeitlich und räumlich immer begrenztere Prognosen herausgeben.

Es besteht kein Zweifel: trotz aller Schwierigkeiten, die in Theorie und Praxis noch vorhanden sind, haben die Forschungsergebnisse der modernen Meteorologie, wie sie gipfeln in der bestimmten Fassung der asymmetrischen Zyklone und der Polarfront, unsere Kenntnisse vom eigentlichen Wesen der atmosphärischen Vorgänge bedeutend erweitert. Die mehr als bisher physikalisch gerichtete Auffassung, die bestimmte, leicht faßliche dynamische Betrachtungsweise ist allenthalben in der Meteorologie lebhaft aufgegriffen worden. Sie wird für die weitere Entwicklung der Meteorologie von großem Einfluß sein, besonders auch für die praktische Wetterkunde, welche hiervon die seit langem ersohnte wesentliche Fortbildung der Vorhersagemethoden erhofft.

Literatur:

1. J. Bjerknes, Über die Fortbewegung der Konvergenz- und Divergenzlinien. Meteorol. Zeitschrift 1917, S. 10.
2. V. Bjerknes, Wettervorhersage. Meteorol. Zeitschrift 1919, S. 68.
3. J. Bjerknes, On the structure of moving cyclones. Geofysiske Publikationer I, 2. Kristiania 1919.
4. V. Bjerknes, The structure of the atmosphere, when rain is falling. Quarterly Journal of the R. Met. Soc., London 1920, S. 119.
5. V. Bjerknes, Om Vaer- og Stormvarslingar og Veien til at forbedre dem. Teknisk Ukeblad Nr. 22, 1920.
6. V. Bjerknes, The meteorology of the temperate zone and the general atmospheric circulation.

Nature, Juni 1920, und Monthly Weather Review 1921, S. 1.

7. J. Bjerknes und H. Solberg, Meteorological conditions for the formation of rain. Geofysiske Publikat. II, 3. Kristiania 1921.
8. R. Wenger, Neue Grundlagen der Wettervorhersage. Meteorolog. Zeitschrift 1920, S. 241.
9. F. M. Exner, Anschauungen über kalte und warme Luftströmungen nahe der Erdoberfläche und ihre Rolle in den niedrigen Zyklogen. Geografiska Annaler II, 3, S. 225. Stockholm 1920.
10. A. Wegener, Sind die Zyklogen Helmholtzsche Luftwogen? Meteorolog. Zeitschrift 1921, S. 300.

Besprechungen.

Ostwald, Wilhelm, Die Farbenlehre. 4. Buch. Physiologische Farbenlehre v. H. Podestà. Leipzig, Unesma G. m. b. H., 1922. XI, 274 S., 29 Abb. und 1 Tafel. 16×25 cm. Preis M. 40,— + 20 % Sort.-Zuschlag.

Seit einer Reihe von Jahren beschäftigt sich W. Ostwald mit Arbeiten über den Farbensinn. Er ist dabei bestrebt, seinen z. T. in engem, wenn auch unbewußtem Anschluß an Herings Gedankengänge sich aufbauenden theoretischen Auffassungen eine praktische Auswertung zu geben. In Großbothen sind auf Ostwalds Anregung hin die Energiewerke G. m. b. H. entstanden, welche sich zur Aufgabe gestellt haben, namentlich für das Kunstgewerbe die durch Ostwalds Forschungen gewonnenen Resultate nutzbar zu machen. Über die Farben- und neuerdings auch über die Formenharmonien liegen zusammenfassende Darstellungen von Ostwald vor, die als Frucht seiner eingehenden Studien Beachtung verdienen, wenn sie mitunter auch, wie es kürzlich durch eine Entschließung der Künstlerschaft einer süddeutschen Stadt geschah, als nicht für die reine Kunst gültig, abgelehnt worden sind. Doch bietet die Lektüre dieser Bücher mannigfache Anregung. Ostwald hat eine zusammenfassende Darstellung seiner Forschungen in dem auf 5 Bücher berechneten Werk: „Die Farbenlehre“ in Angriff genommen. Von diesen liegen bisher 2 von Ostwald selbst geschriebene Bände vor. Der erste umfaßt die „mathetische“ Farbenlehre, d. h. er beschäftigt sich mit der Ordnung der vorkommenden Farbenempfindungen, ausgehend von dem Gedanken, daß zu einer ersprießlichen Forschung in einer Disziplin zunächst ihre Einordnung in das Gesamtgebäude der Wissenschaften und sodann eine strenge systematische Gliederung der zugrunde liegenden Tatsachen notwendig ist. Der zweite Band, der sich mit der physikalischen Farbenlehre befaßt, bietet die Schilderung der physikalischen Vorbedingungen für das Farbensehen, welches als psychisches Phänomen in dem Schlußband behandelt werden wird. Der dritte bisher noch nicht erschienene Band soll eine Chemie der Farbenlehre bringen, also voraussichtlich wohl eine Chemie der Farbstoffe. Der jetzt vorliegende vierte Band behandelt die Physiologie des Farbensinnes. Wie Ostwald in einem Vorwort bemerkt, fühlt er sich auf diesem Gebiet zu wenig zu Hause und konnte die Zeit zum Einarbeiten in diese schwierigen Fragen nicht mehr erübrigen. Er hat deshalb die Bearbeitung dem Marinegeneralarzt a. D. Podestà, der durch Herausgabe von sogenannten pseudoisochromatischen Tafeln zur Untersuchung auf Farbtüchtigkeit bekannt ist, übertragen. Von allgemeinem Gesichtspunkte aus muß bedauert werden, daß damit die Einheitlichkeit des