

Hoch- und Tiefdruckwirbel bestimmen unser Wetter

Die in mittleren Breiten vorherrschenden Wettersysteme (Hoch- und Tiefdruckgebiete) werden durch wellenförmige Instabilitäten des Jetstreams verursacht. Für die Physik der Hochdruckwirbel ist die Corioliskraft entscheidend, deren Wirkung auf dem Sesselkarussell erlebt werden kann.

Das Sesselkarussell gehört zu meinen schönsten Kindheitserlebnissen. Besonders faszinierte mich das verbotene Spiel, dem in der inneren Sesselreihe sitzenden Bruder die Hand zu reichen, ihn an mich zu ziehen und dann loszulassen. Das in Abb. 1 gezeigte Sesselkarussell dreht sich von oben betrachtet im Uhrzeigersinn und die beiden Jünglinge im Vordergrund sind daran, dieses Spiel auszuprobieren. Sie haben sich soeben losgelassen und derjenige im äusseren Sessel fliegt durch die Zentrifugalkraft nach aussen. Da er für die weiter aussen liegende Bahn zu langsam ist, fällt er zurück und nimmt durch die Zugkraft der Aufhängeseile Fahrt auf. Da er über seine Gleichgewichtslage hinaus geschleudert wurde, fällt er wieder nach innen und erreicht eine Bahn unterhalb seines Gleichgewichtspunktes mit zu hoher Geschwindigkeit. Deshalb wird er durch die Aufhängeseile abgebremst und beschreibt einen Bogen im Gegenuhrzeigersinn nach aussen, wo er wieder beschleunigt wird. Er bewegt sich also nahezu kreisförmig um seinen Gleichgewichtspunkt und seine Drehrichtung ist der Rotation des Karussells entgegengesetzt. Die Zuschauer am Boden sehen jedoch keine Kreisbahn, sondern eine Wellenbewegung um die Gleichgewichts-Kreisbahn.

Analogie zu Jetstream-Wellen

Anstelle der Sessel betrachten wir nun Luftpakete des Polarfront-Jetstreams, die auf etwa 50-60 Grad nördlicher Breite von Westen nach Osten um den Globus kreisen. Sie rasen mit mehreren hundert Kilometern pro Stunde gegenüber der sich in derselben Richtung drehenden Erdkugel und befinden sich rund 10 Kilometer über Meer. Störungen bewirken, dass analog zum Sesselkarussell mäandrierende Wellen rund um den Globus entstehen. Vom Erdbö-



Abb. 1: Auf einem Sesselkarussell kann man die Corioliskraft erleben. Erläuterungen im Text.

den aus sieht man analog zum Beobachter im Karussellsessel nicht Wellen, sondern annähernd kreisförmige Wirbel, die beide Drehrichtungen haben können. Dies sind die Hoch- und Tiefdruckwirbel, die normalerweise innert weniger Tage vom Atlantik her kommend mit etwa Innerortsgeschwindigkeit über Europa hinwegwandern.

Physikalische Analyse

Die Analogie zwischen Druckzentren und Karussell ist nicht exakt, da der Luftdruck nicht korrekt abgebildet wird, Zentrifugal- und Corioliskraft wirken jedoch analog. Beides sind Scheinkräfte, weil sie nur in einem Koordinatensystem auftreten, das an einem rotierenden Körper festgemacht ist. Man muss deshalb das Newtonsche Bewegungsgesetz (Kraft = Masse \times Beschleunigung), das nur für Inertialsysteme gilt, in rotierende Koordinatensysteme transformieren. Die rein mathematische Operation ergibt ein komplizierteres Bewegungsgesetz, das Zentrifugal- und Corioliskraft enthält: $p = d \times r \times (c + d)$

p ist die Druckkraft, die bei einem Hochdruckwirbel negativ ist, weil der Druck mit zunehmendem Radius r kleiner wird. d ist die Winkelgeschwindigkeit eines Luftpaketes, das sich auf einer Kreisbahn mit Radius r um das Druckzentrum herum bewegt. Der Faktor $d \times r$ vor der Klammer ist die Geschwindigkeit

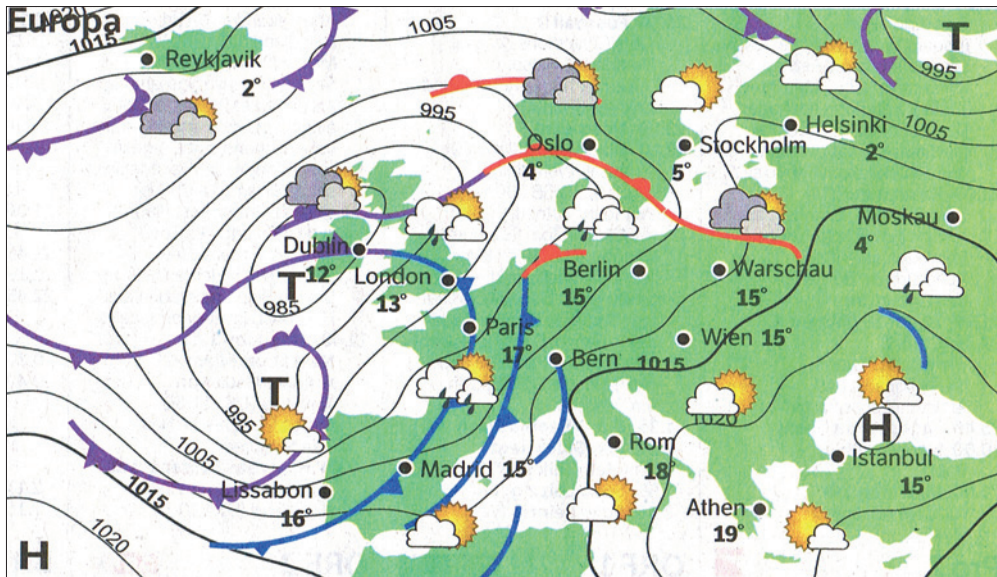


Abb. 2: Bodendruckkarte vom 3. April 2018. Die fett gezeichnete 1015 hPa-Isobare zeigt den ungefähren Verlauf der Jetstream-Welle.

des Luftpaketes. $d^2 \times r$ ist die Zentrifugalkraft, die immer positiv ist und nach aussen zeigt. $d \times r \times c$ ist die Corioliskraft, die proportional zum Coriolisparameter c ist. Für nördliche Breiten um 45 Grad beträgt dieser etwa $0,00001 = 10^{-5}$ pro Sekunde (er ist proportional zur Rotationsgeschwindigkeit der Erde und zum Sinus der geografischen Breite).

Ohne Corioliskraft keine Hochdruckwirbel

Am Äquator ist $c=0$ und daher $p = d^2 \times r$ immer positiv; deshalb kann es dort keine Hochdruckwirbel geben. Für ein Hochdruckgebiet (p negativ) auf der Nordhalbkugel muss d negativ sein (r und c sind positiv). Definitionsgemäss bedeutet dies eine Drehung im Uhrzeigersinn, also entgegengesetzt zur Drehrichtung der Erde. Die Kreisbahnen beim Karussell entsprechen also Hochdruckgebieten. Die Bewegungsgleichung zeigt auch, dass d nur wenig negativ sein darf, damit $c+d$ positiv bleibt. Mit Hilfe einer Bodendruckkarte (Abb. 2) lassen sich die Grössen p und r berechnen: Die fettere Isobare 1015 Millibar (mb) oder Hektopascal (hPa) zeigt etwa den mittleren Luftdruck auf Meereshöhe. Die beiden folgenden Isobaren um das Hochdruckzentrum herum haben die Werte 1020 und 1025 hPa. Die Druckkraft zwischen diesen beiden Isobaren beträgt -5 dividiert durch die mittlere Distanz zwischen den Isobaren in Metern (rund 500000). Genau genommen müsste man noch durch die Luftdichte dividieren, die wir näherungsweise als 1 Kilo-

gramm pro Kubikmeter annehmen können. Wir erhalten so für p etwa -10^{-5} Meter pro Quadratsekunde. Mit $d = -c/2$ als Beispiel gibt die Bewegungsgleichung eine sehr kleine Windstärke von 2 Metern pro Sekunde in einem Umkreis r von 400 Kilometern. Für jede andere Wahl von d erhalten wir grössere Radien und kleinere Geschwindigkeiten. Die Druckverteilung im Zentrum eines Hochdruckwirbels ist also sehr flach und die Winde sind kaum spürbar. Mit der Bewegungsgleichung erhalten wir Werte, die mit den Beobachtungen übereinstimmen!

Warum scheint die Sonne?

Unsere obigen Überlegungen gelten für Höhen über etwa 2000 Metern über Meer. Darunter macht sich die Reibung an Vegetation, Hügeln und Bergen bemerkbar und bremst die Winde ab. Dadurch wird die Windrichtung in die Richtung vom Hoch zum Tief gedreht, ist also nicht mehr parallel zu den Isobaren. Luft fliesst deshalb rundherum aus dem Hochdruckwirbel heraus und es muss Luft von oben her nachfliessen. Diese langsam (wenige Zentimeter pro Sekunde) absteigende Luft wird aufgrund des zunehmenden Luftdrucks zusammengepresst und erwärmt sich dabei um rund 1 Grad Celsius pro 100 Meter Abstieg. Allfällige Wolken verdampfen, die Luft ist trocken und klar, es scheint tagsüber die Sonne!

Fritz Gassmann
Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.