



## Schulbiologiezentrum Hannover

Vinnhorster Weg 2, 30419 Hannover

Tel: 0511-168-47665/7

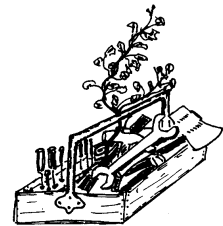
Fax: 0511-168-47352

Email : schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de

Hannover

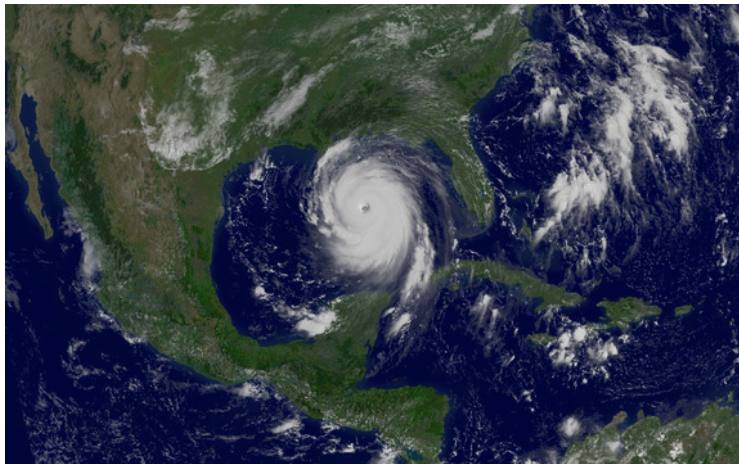
### Unterrichtsprojekte Natur und Technik

19.66



### Wilma, Rita, Katrina, Larry und die anderen... Experimente zur Geo-Physik der Wirbelstürme

Hurrikan „Katrina“ am 28.08.05 (15:45 UTC), Foto NOAA



#### Vorwort

Alle Jahre wieder machen „Killerstürme“ wie Katrina, Rita, Wilma oder Larry Schlagzeilen. Jede neue Hurrikan-Saison scheint neue Rekorde in Sachen Häufigkeit und Heftigkeit zu brechen. Und jedes Mal scheint uns bestätigt, was wir, die von Tod und Schäden in diesem Fall nicht selbst berührten, schon längst wussten: Das Klima läuft aus den Fugen! Und scheint, einer himmlischen Strafe gleich,

auf die einzuschlagen, die mit ihrem hohen Energieverbrauch besonders viele Treibhausgase emittieren. „Schlägt die Erde jetzt zurück?“ schrieb eine deutsche Zeitung. Soweit – überspitzt formuliert - die gängigen Vorurteile. Populärwissenschaftliche Sendungen über Wirbelstürme verzeichnen hohe Einschaltquoten und die Klimadiskussion der letzten Jahre hat viel Fach-, aber auch viel Halbwissen in die Öffentlichkeit getragen.

Wir möchten Ihnen mit dieser Arbeitshilfe Anregungen für eine physikalisch-geografische Behandlung des Themas geben und tun dies – wie üblich – auf eine möglichst praxisorientierte Weise. Die Experimente sollten sich im Laufe der Zeit zu einem fundierten Gesamtbild zusammenfügen das erlaubt, das Phänomen Wirbelsturm auch politisch bewerten zu können.

Dabei stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- Was ist Wind?
- Welche Kräfte stecken im Wind?
- Was macht einen Wirbelsturm so gefährlich?
- Warum „wirbeln“ Wirbelstürme?
- Welche Zugbahnen nehmen Wirbelstürme und warum?
- Warum gibt es in Deutschland keine Wirbelstürme wie „Katrina“?
- Was erwartet uns in der Zukunft?

Die Beantwortung dieser Fragen führt uns tief in die in der Schule zumeist „heimatlose“ Meteorologie, in die Physik und in die Geografie. Einige der vorgeschlagenen Experimente haben wir bereits unter anderen Aspekten veröffentlicht. Das Thema Wirbelstürme ist nicht unbedingt als geschlossener Lehrgang zu verstehen, obwohl man damit durchaus eine Projektwoche bestreiten kann. Denkbar wäre es auch, Einzelaspekte – vielleicht auch in ganz anderen Zusammenhängen - herauszugreifen.

Wir haben uns bemüht, komplizierte Fachzusammenhänge möglichst einfach und anschaulich darzustellen, in der Hoffnung, dass Sie das eine oder andere so auch im Unterricht umsetzen können.

Aus der Arbeitshilfenreihe „Natur und Technik“ des Schulbiologiezentrum Hannover empfehlen wir zusätzlich folgende wetter- und klimarelevanten Hefte:

- Windmesser zum Selbstbau
- Die „Prima-Klima-Box“ zur Demonstration von Land- und Seewind
- Experimente zum Treibhauseffekt
- „Wetterküche“, 35 Experimente

Wir würden uns über Rückmeldungen freuen!

Ingo Mennerich  
Schulbiologiezentrum Hannover  
Sylt, April/Oktober 2006

**Titel:** **Wilma, Rita, Katrina, Larry und die anderen...  
Experimente zur Geo-Physik der Wirbelstürme**

**Arbeitshilfe Nr. 19.66**

Verfasser: Ingo Mennerich, April/Oktober 2006

Redaktion, Fotos,  
und Layout

Ingo Mennerich,  
Titel: National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA)

Herausgeber

Landeshauptstadt Hannover  
Fachbereich Bibliothek und Schule  
Vinnhorster Weg 2  
30419 Hannover  
Tel.: 0511-168-47665/7  
Fax: 0511-168-47352  
Email: [schulbiologiezentrum@hannover.de](mailto:schulbiologiezentrum@hannover.de)  
Internet: [www.foerdereverein-schulbiologiezentrum.de](http://www.foerdereverein-schulbiologiezentrum.de)

Hannover 2006

## Inhalt:

|  |    |
|--|----|
| Wie entsteht Wind?   | 4  |
| Heiße Tropen, kalte Pole   | 4  |
| Heiße Luft steigt auf  | 5  |
| In warmem Wasser steckt viel Energie, im Wasserdampf noch viel mehr                    | 5  |
| Wasserdampf kondensiert, wenn sich Luft ausdehnt                                       | 6  |
| Feuchtadiabatisch: Die eigentliche Triebkraft eines Wirbelsturms                       | 6  |
| Tropische Wirbelstürme entstehen über warmen Meeren                                    | 7  |
| Warum wirbeln Wirbelstürme?  | 8  |
| Das „Auge“ des Wirbelsturms  | 9  |
| Nichts steht still auf der Erde...   | 9  |
| Ein kurzes Gedankenspiel zum späteren Verständnis...                                   | 10 |
| Corioliskraft  | 10 |
| Dreht sich die Erde links oder rechts herum?   | 11 |
| Warum driften tropische Wirbelstürme zunächst nach Westen?                             | 12 |
| Links- oder rechts herum?  | 13 |
| Rechts- und linksherum: Wirbelstürme in nördlichen und südlichen Breiten               | 14 |
| Fahrt gewinnen – Warum der Wirbelsturm stärker wird wenn wer sich vom Äquator entfernt | 14 |
| Vom tropischen Wirbelsturm zum „normalen“ Tiefdruckgebiet                              | 15 |
| Zyklone mit Warm und Kaltfront   | 15 |
| Welche Kräfte stecken im Wind?   | 16 |

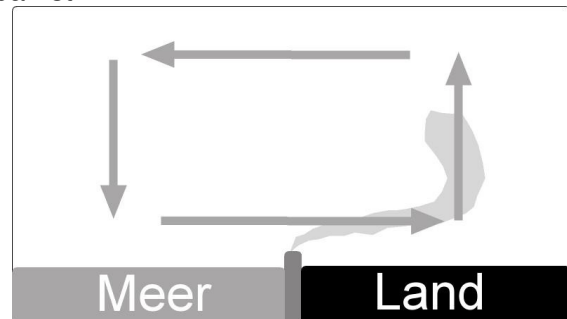
## Wie entsteht Wind?



Entgegen einer häufig geäußerten Ansicht wird der Wind nicht durch die Drehung der Erde verursacht. Wäre dem so, dann hätten wir ständig Ostwind! Wind entsteht zwischen Gebieten hohen und tiefen Luftdrucks, also von der Sonne unterschiedlich erwärmten Luftpaketen. Insofern ist Wind in Bewegung von Luft umgewandelte Sonnenenergie. Unser „Demonstrationsmodell zur Windentstehung“ ist ein in einen „Meer-„ und einen „Landbereich“ geteiltes, durch einen abnehmbaren Glasdeckel verschließbares Terrarium. Es wird – bei abgenommenem

Deckel – von einem starken Strahler („Sonne“) erwärmt. Das aus dunklem Kies und Steinen aufgebaute „Land“ erwärmt sich erheblich schneller als das „Meer“ was mit der Fingerprobe oder dem Infrarot-Thermometer schnell nachweisbar ist.

Sobald das notwendige Temperaturgefälle hergestellt ist wird der Deckel aufgesetzt. Ein an einer Niedervolt-Gleichspannungsquelle angeschlossener und zwischen „Land“ und „Meer“ aufgestellter Modellbahn-Dampferzeuger zeigt die einsetzende Luftbewegung: Der Dampf wird mehr oder weniger horizontal vom „Meer“ zum „Land“ geblasen, steigt über dem „Land“ auf und wandert langsam unter dem Deckel zurück um über dem „Meer“ abzusinken und erneut in den Kreislauf hineingezogen zu werden. Das über dem „Meer“ verdunstende Wasser kondensiert – wenn die Abdeckscheibe gekühlt wird - über dem „Land. Die Glasplatte wird - bei ausgeschalteter „Sonne“! –über dem „Land“ etwas wärmer als über dem „Meer“ weil bei der Kondensation des Wasserdampfes die in die Verdunstung investierte Wärme wieder frei wird. Dieser Zusammenhang spielt bei der Entstehung von Wirbelstürmen eine große Rolle.



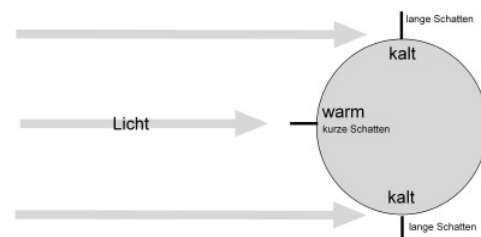
## Heiße Tropen, kalte Pole



Ein weißer Ball, beklebt mit schwarzen Streifen zeigt die Ursachen der Luftmassenbewegungen auf der Erde (planetarische Zirkulation). Der Ball wird mit einer Leuchte seitlich bestrahlt. Die unterschiedlichen Einstrahlungswinkel am Äquator beziehungsweise an den Polen führen zu bereits mit den Fingern spürbaren Temperaturunterschieden. Exakte Werte erhält man mit einem Infrarot-Thermometer, das berührungslos misst.

An sonnigen Tagen

legen wir einen großen Gymnastikball so in einen Eimer, dass die Sonne senkrecht auf den „Äquator“ fällt. Der „Äquator“ wird warm, die „Pole“ bleiben kühl. Wenn Sie mit etwas Knetmasse gleich lange Stäbe senkrecht auf den Äquator bzw. die Pole setzen werfen sie unterschiedlich lange Schatten.



### Heiße Luft steigt auf

Heißluftballons steigen, eine günstige Wetterlage vorausgesetzt, hoch in den Himmel auf. An sehr kalten Tagen kann man eine dünne große (!) Plastiktüte mit Heißluft (Föhn oder Heißluftpistole) füllen zum Fliegen bringen.

Aus heißer, aufsteigender Luft lässt sich darüber hinaus Strom gewinnen. Unser Modell eines „**Aufwindkraftwerks**“ zeigt das Prinzip, bei dem über einer von der Sonne bestrahlten schwarzen Metallfläche Luft erhitzt wird. Die Luft steigt in einer Röhre auf an deren oberem Ende sich dann eine kleine Turbine dreht. Wenn man zwei gegenüberliegende Seiten abdichtet kann das Aufwindkraftwerk als einfaches Modell der globalen Windsysteme dienen: Im stark erwärmten Zentrum (Äquator) steigt die Luft auf, sie wird von beiden Seiten (nördliche und südliche Halbkugel) durch kühlere Luft ersetzt.

Warum wird warme Luft beim Aufstieg kälter? Die oft gehörte Erklärung, dass sie die Wärme an ihre (kältere) Umgebung abgibt ist zwar nicht falsch, trifft nur einen Teil des Sachverhalts. Warme Luft kann sich beim Aufstieg – von der Last der darüber liegenden Luftschichten befreit – ausbreiten. Sie gerät in Zonen geringeren Drucks und dehnt sich aus. Expandierende Luft verliert Energie und kühlt sich ab. Dies kann man durch einfache Experimente zeigen:



- Wird der Messfühler eines Digitalthermometers in eine Spritze geschoben und die Öffnung fest mit dem Daumen verschlossen sinkt die Temperatur in der Spritze um einige Grade ab wenn man den Kolben schnell herauszieht.
- So wie ein Reifenventil beim Aufpumpen heiß wird kühlt es sich ab, wenn die Luft aus dem Reifen gelassen wird.
- Der Sprühkopf einer Spraydose kühlt sich bei Gebrauch ab weil dass unter Druck stehende flüssige Treibgas expandieren kann.

### In warmem Wasser steckt viel Energie, im Wasserdampf noch viel mehr

Wer mit unserem Muskelkraftwerk, einem Heimtrainer mit angeschlossenem Generator, Wasser zum Kochen bringt, erfährt am eigenen Leibe wie viel Energie in heißem Wasser steckt. In Zahlen ausgedrückt:

Um 1 g Wasser um 1 °C zu erwärmen müssen 4,2 Joule Energie investiert werden. Um einen Liter 20° warmes Wasser zum Sieden zu bringen braucht es  $1000 \times 80 \times 4,2 = 336$  KJ Energie.

Soll siedendes Wasser von 100 °C auf 101 °C erhitzt werden ist sogar ein erheblich höherer Energieaufwand nötig. Beim Übergang von der flüssigen in die gasförmige Phase müssen die elektrostatischen Bindungen zwischen den polar gebauten Wassermolekülen aufgebrochen werden. Im flüssigen Zustand „kleben“ die Wassermoleküle aneinander, die positiven Enden (Wasserstoff) gehen mit den negativen Enden (Sauerstoff) anderer Moleküle lockere Bindungen ein. Die zum Lösen dieser Bindungen notwendige Verdampfungsenergie beträgt 2088 J/g, also 2088 KJ/Liter. Um einen Liter 20° C warmes Wasser vollständig zu verdampfen bedarf es folglich  $336 + 2088 = 2424$  KJ Energie.



Was hat das mit Wirbelstürmen zu tun? Auch beim Verdunsten über einer Wasseroberfläche wird Verdampfungsenergie investiert die die Umgebung abkühlt (Verdunstungskälte). Dieser Betrag wird bei der Kondensation wieder als Wärme frei.

- Tropft man etwas Aceton auf die Haut, wird die Hautpartie kalt. Aceton verdunstet leicht bei Raumtemperatur, der Verdunstungsvorgang entzieht der Umgebung Wärme.
- Wenn man den Messfühler eines Digitalthermometers in auf Raumtemperatur eingestelltes Wasser bringt und gleich darauf wieder herauszieht, ist ein deutlicher Abfall der gemessenen Temperatur zu beobachten. Sobald der dünne Wasserfilm auf dem Fühler verdunstet ist, steigt die Temperatur wieder an.

Das Thema „Verdampfungswärme“ lässt sich auch beim Kochen untersuchen:

- Kann flüssiges Wasser heißer als 100° C werden? Bei „normalem“ Luftdruck von etwa 1000 hPa nicht! So viel Energie wir auch hineinstecken, das Wasser verharrt so lange bei 100 Grad bis es vollständig verdampft ist. Erst dann steigt die Temperatur wieder.
- Ein Dampfdrucktopf spart Energie, weil das Wasser unter höherem Druck erst bei höheren Temperaturen siedet. Er braucht kaum Verdampfungsenergie und die Kochzeiten werden erheblich verkürzt („Schnellkochtopf“).

### **Wasserdampf kondensiert, wenn sich Luft ausdehnt**

Der folgende Versuch zeigt, dass Verdunstung und Kondensation vom Luftdruck bestimmt wird. Zur Vorbereitung verbinden Sie eine (Fuß-) Luftpumpe über einen Adapter mit einem Fahrradventil. Über das Fahrradventil ziehen Sie etwa 10 cm Aquarienschlauch. Stecken Sie diesen durch die Öffnung eines auf eine große, möglichst nachgebende PET-Flasche passenden Stopfens.

- Geben Sie etwas Wasser in die Flasche und schwenken Sie sie so, dass ihre Innenseite nass ist. Pumpen Sie dann die Flasche mit einer Luftpumpe kräftig auf. Wenn der Stopfen aus der Flaschenmündung fliegt, füllt sich die Flasche mit Nebel, den sie durch leichtes Drücken in „Nebelkringel“ (keine „Rauchkringel!“) verwandeln können. Der Versuch ist umkehrbar: Erneutes Aufpumpen lässt den Nebel verschwinden.



### **Feuchtadiabatisch: Die eigentliche Triebkraft eines Wirbelsturms**

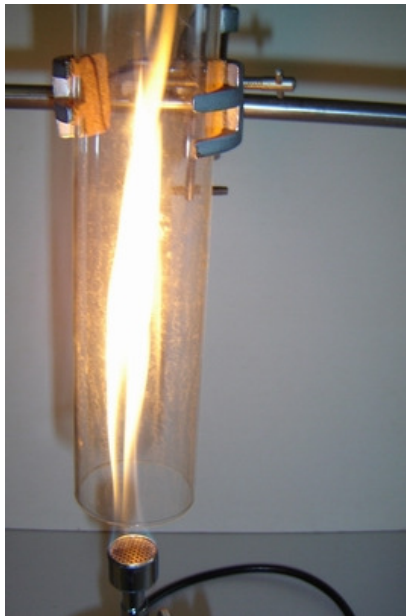
„Feuchtadiabatisch“: Hinter diesem in der Meteorologie gebräuchlichen Fachbegriff verbirgt sich die eigentliche Triebkraft eines Wirbelsturms. Das Faktum, dass warme Luft in kühlerer Umgebung aufsteigt reicht zur Erklärung der gewaltigen in einer Zyklone entfesselten Kräfte bei weitem nicht aus. Trockene, warme Luft kühlt sich beim Aufstieg ab und wenn die umgebende Luft ebenfalls kühl ist, kommt der Auftrieb bald zum Erliegen. Ganz anders verhält sich feuchte Luft. Trocken- und feuchtadiabatischer Aufstieg entfalten eine völlig unterschiedliche Dynamik.

Bei der im tropischen Wirbelsturm aufsteigenden Luft handelt es sich um wasserdampf-gesättigte Luft die in der Höhe kondensiert. Der riesige Wolkenwirbel besteht aus Wassertropfen. Bei der Kondensation des gasförmigen (unsichtbaren!) Wasserdampfs wird die bei der Verdunstung des Meerwassers investierte Energie wieder abgeben. Trockene Luft wird beim Aufstieg kälter. Wasserdampfreiche Luft dagegen erhält beim Aufstieg durch die Kondensation einen zusätzlichen Energieschub. Sie bleibt im Verhältnis zu trockenadiabatisch aufsteigender Luft auch in der Höhe wärmer und steigt umso beschleunigter nach oben.

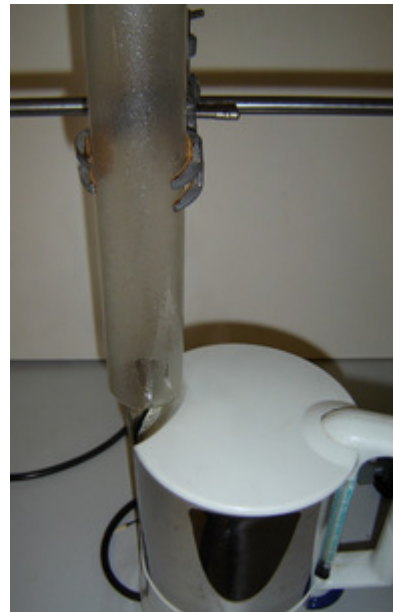
Folgender Versuch macht diesen Zusammenhang deutlich:

- Ein voll aufgedrehter Bunsenbrenner wird unter ein hitzebeständiges senkrecht an einem Stativ montiertes 1,5 m langes Rohr gestellt. Das Rohr wird unten heiß, in etwas größerer Höhe lässt es sich aber problemlos anfassen. Wenn wir den Bunsenbrenner durch einen Wasserkocher ersetzen wird der Wasserdampf das Rohr in seiner ganzen Länge so stark erhitzen, dass man es nicht anfassen kann.

Wird ein Glasrohr verwendet kann man die Tropfenbildung an der Innenseite beobachten.



Glasrohr mit Bunsenbrenner



Glasrohr mit Wasserkocher

- Messen Sie bei dem im vorigen Abschnitt vorgestellten Versuch zur Nebelbildung die Temperatur. Wir benutzen dafür ein Digitalthermometer mit einem Drahtmessfühler. Untersuchen Sie zunächst, was in einer trockenen Flasche geschieht. Beim Aufpumpen steigt die Temperatur stark an, beim Lösen des Stopfens fällt sie stark ab. Nebel bildet sich nicht. Wenn Sie den Versuch mit der feuchten Flasche wiederholen, fällt die Temperatur nur geringfügig oder gar nicht ab. Wenn die geschlossene (!) Flasche vorher eine Zeit lang in der Sonne stand, ist bei Druckentlastung und Kondensation manchmal sogar ein Temperaturanstieg zu beobachten.

### **Tropische Wirbelstürme entstehen über warmen Meeren**

Die amerikanischen Hurrikane und die asiatisch-pazifischen Taifune entstehen bevorzugt im August und September, die australischen Willie-Willies im Februar und März. Alle Wirbelstürme haben ihren Ursprung über dem warmen Ozean.

Nur dort erreichen die Temperaturen die erforderlichen hohen Werte und nur dort verdunstet hinreichend viel Wasser dass sich die hineingesteckte Energie beim feuchtadiabatischen Aufstieg so gewaltsam entladen kann.

Auf der Nordhalbkugel erreichen die Meerestemperaturen ihr Maximum im August, dann nämlich, wenn die Sonne lange genug nahezu senkrecht über dem Meer gestanden hat. Am 21. Juni steht sie zur Mittagszeit senkrecht über dem nördlichen Wendekreis ( $23,5^\circ$  N), danach „wandert“ sie wieder in äquatoriale Breiten zurück. Zu Beginn des Nordwinters am 21.12. steht sie senkrecht über dem südlichen Wendekreis ( $23,5^\circ$  S) um sich dann wieder auf den Weg nach Norden zu machen. Erst dann erreichen die Temperaturen der Ozeane südlich des Äquators die höchsten Werte.

Nicht überall sind die Bedingungen für die Entstehung von Wirbelstürmen gegeben. Auffällig ist, dass sie ein typische Ostküstenphänomen sind. An den tropischen Westküsten gibt es keine Wirbelstürme. Aber auch im Osten, wie zum Beispiel im Nordosten Afrikas oder an der südamerikanischen Ostküste sind Wirbelstürme selten.

Zur Erklärung hilft ein Blick auf den Atlas:

- In äquaturnahen Breiten weht der Wind aus östlichen Richtungen (Passate). Mit dem Ostwind ziehen die embryonalen Wirbelstürme nach Westen und treffen dann auf die Ost- und nie auf die Westküsten. Die Ursache für den östlichen Wind ist die nach Osten gerichtete Rotation der Erde und die daraus resultierende, ablenkende Corioliskraft (s. u.).
- Die äquaturnahe Innertropische Konvergenzzone (ITC), die Zone in der die Passatwinde der nördlichen und der südlichen Halbkugel aufeinander treffen, wandert mit dem sich im Jahresverlauf ändernden Sonnenstand von Norden (Juni) nach Süden (Dezember). Die ITC wird durch große Landmassen, die sich leichter erwärmen als das Wasser stark nach Norden bzw. nach Süden ausgelenkt. Das ist im Juni über Asien der Fall, wo sie weit über den Indischen Subkontinent ausgreift. Das ist der Grund für das Fehlen von Wirbelstürmen an der nordostafrikanischen Küste. Im Dezember verschiebt sie sich über Südamerika und Afrika weit nach Süden, bleibt aber auch dann über dem Atlantik in äquaturnahen Breiten.
- Die Zugbahnen der Wirbelstürme folgen den großen warmen Meeresströmungen: In Amerika ist dies die Süd- und Nordäquatorialströme aus denen der Karibik- und der Golfstrom hervorgehen. Japan und China liegen im Bereich des Kuro-Schio-Stroms, der über dem äquatorialen Nordpazifik sehr lang „Anlauf“ nehmen kann.

### Warum wirbeln Wirbelstürme?



An einem Wehr oder einem durch hartes Gestein auf einen engen Querschnitt beschränkten Fluss kann man beobachten, wie das beschleunigte Wasser Strudel bildet. Je schneller das Wasser fließt desto ausgeprägter die Strudel.

Auch wenn Wasser, der Schwerkraft folgend durch einen Trichter fließt bildet sich ein Strudel.

Im links abgebildeten Falle kann untersucht werden, unter welchen Bedingungen sich ein Strudel bildet. Wenn die Trichtermündung durch einen Stopfen verschlossen und der Trichter randvoll mit Wasser gefüllt wird kann man auch der Frage nachgehen, ob es stimmt, dass das Wasser stets nur in eine Richtung strudelt.



Aus zwei zusammengeklebten und durch ein Loch verbundenen Flaschen entsteht ein interessantes Spielzeug mit dem man eindrucksvolle „Wirbelstürme“ erzeugen kann. Eine der Flaschen wird mit Wasser gefüllt. Es gibt mehrere Möglichkeiten, das Wasser aus der einen in die andere Flasche zu bringen. Eine davon ist, das Wasser durch schnelles Schwenken der Flaschen in eine Drehbewegung zu versetzen. Dann strudelt das Wasser tornadoähnlich aus der oberen in die untere Flasche. Durch das „leere“ Innere des Strudels steigt die Luft aus der unteren in die obere Flasche.



**Das „Auge“ des Wirbelsturms**

Im Zentrum eines tropischen Wirbelsturms ist der Himmel klar und es herrscht fast Windstille. Die schnelle Rotation des Systems führt zu gewaltigen Zentrifugalkräften die die Luft aus diesem Bereich herausschleudern. Ein ähnlicher Effekt trifft beim „Flaschentornado“ auf und führt dazu, dass Luft aus der unteren Flasche nach oben dringen kann.

**Nichts steht still auf der Erde...**

Der Stuhl auf dem ich sitze, der Schreibtisch an dem ich arbeite und ich haben etwas gemeinsam. Wir ruhen nicht sondern sind in steter Bewegung. Tag und Nacht. Wir befinden uns nicht im ICE und nicht im Flugzeug, sondern zu Haus. Jeder Ort auf der Erde folgt der Rotationsbewegung der Erde und viele von uns sind mit Überschallgeschwindigkeit unterwegs ohne es zu spüren. Auf dem Äquator bewegt sich jedes Objekt mit  $40000 \text{ km} : 24 \text{ h} = 1666,7 \text{ km/h}$  nach Osten. Die Sonne scheint im Osten aufzugehen, doch in Wirklichkeit schießen wir mit dieser Geschwindigkeit auf sie zu um mittags unter ihr durch und abends von ihr weg zu rasen. Auf den Polen scheinen wir und im Laufe eines Tages nur um die eigene Achse zu drehen, sonst aber wenigstens in Bezug auf die Erde zu ruhen.

Die Geschwindigkeit an allen anderen Orten ist abhängig vom Breitengrad ( $\delta$ ) und errechnet sich leicht mit dem Taschenrechner aus der Formel:

$$40000 \text{ km} \times \cos \delta : 24 \text{ h}$$

Für Hannover ergeben sich 1026 km/h.

| Geographische Breite | Länge des Breitenkreises | Rotationsgeschwindigkeit |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 90                   | 0                        | 0                        |
| 80                   | 6945                     | 289                      |
| 70                   | 13681                    | 570                      |
| 60                   | 20000                    | 833                      |
| 50                   | 25712                    | 1071                     |
| 40                   | 30642                    | 1277                     |
| 30                   | 34641                    | 1443                     |
| 20                   | 37588                    | 1566                     |
| 10                   | 39392                    | 1641                     |
| 0                    | 40000                    | 1667                     |

### Ein kurzes Gedankenspiel zum späteren Verständnis...

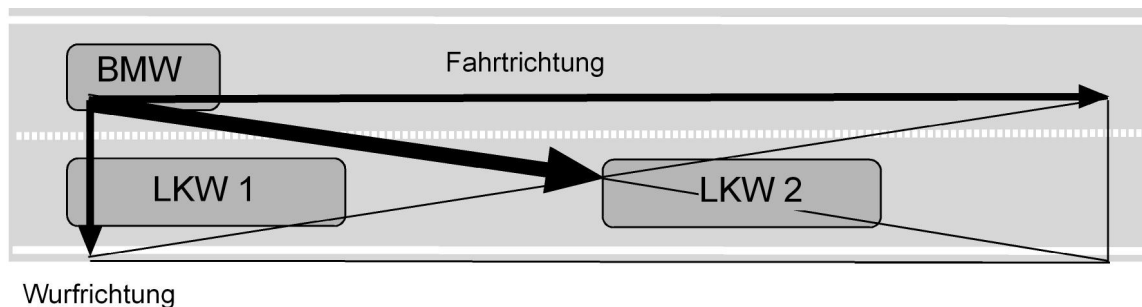
Ein BMW rast mit großer Geschwindigkeit auf der linken Spur einer Autobahn entlang. Auf der rechten „kriechen“ die LKWs. Rechts hinten im BMW sitzt ein Kind und langweilt sich. Es kurbelt die Scheibe herunter und wirft einen Ball aus dem Fenster.

Der Ball fliegt über den Mittelstreifen hinweg und trifft

- Einen schon vorher überholten LKW von vorne
- Einen rechts voraus fahrenden LKW von hinten
- Den zum Zeitpunkt des Abwurfs gerade überholten LKW von der Seite

„Von hinten“ ist richtig. Die Richtung des quer zum BMW heraus geworfenen Balls setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der Wurfrichtung und der Fahrtrichtung des BMWs. Wenn Wurfgeschwindigkeit und Fahrtgeschwindigkeit gleich wäre, würde sich der Ball im 45° Winkel vom BMW entfernen. Tatsächlich wird die Wurfgeschwindigkeit kleiner sein als die Fahrtgeschwindigkeit. Damit fliegt der Ball im spitzen Winkel vom BMW über den Mittelstreifen hinweg. Da er die Fahrtgeschwindigkeit aufgrund der Massenträgheit noch eine Weile beibehält ist er schneller als die LKWs und wird einen zum Zeitpunkt des Abwurfs noch vor ihnen herfahrenden schräg von hinten treffen.

Dieses als Kräfteparallelogramm gezeichnete Beispiel sei angeführt, um später die vielen zunächst paradox erscheinenden Ablenkungseffekte durch die so genannte Corioliskraft deutlich zu machen. Die Eigengeschwindigkeiten der LKWs bleiben der Übersichtlichkeit halber unberücksichtigt.



### Corioliskraft

Angenommen, ein Luftpaket bewege sich genau auf dem Nullmeridian von einem Punkt auf dem 30° Breitengrad zum 20° Breitengrad. Nehmen wir weiterhin an, dass das Luftpaket dazu 12 Stunden brauche. In der Zwischenzeit hat sich die Erde um eine halbe Tageslänge weitergedreht, Start- und Zielort haben sich um 180° verschoben.

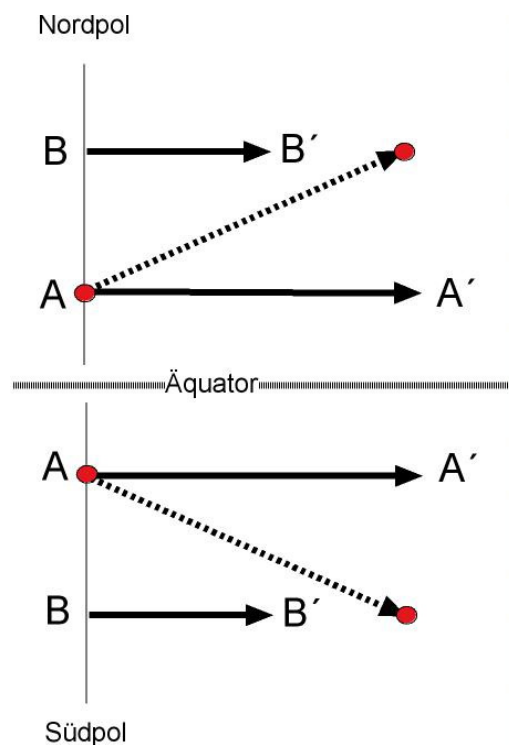
Die beiden Punkte haben jedoch einen unterschiedlich langen Weg hinter sich:

Der Startpunkt auf dem 30° Breitengrad ist um  $40000/2 \times \cos 30 = 17320$  km weiter gewandert. Der Zielort hat mit  $40000/2 \times \cos 20 = 18794$  km einen Vorsprung von 1474 km. Das südwärts wandernde Luftpaket bleibt um diesen Betrag hinter dem Zielort zurück und erfährt so eine Ablenkung.

Die Ablenkung ist abhängig von der Rotationsrichtung und davon ob sich das Luftpaket nach Norden oder nach Süden bewegt.

Die nach dem französischen Physiker Coriolis benannte Ablenkung ist eine Scheinkraft, keine wirklich physikalische Kraft wie beispielsweise die Gravitation.

| Breitengrad | Länge des Breitengrads km | Differenz | Stundengeschwindigkeit |
|-------------|---------------------------|-----------|------------------------|
| 90°         | 0                         | -         | 0                      |
| 80°         | 6945                      | 6945      | 289                    |
| 70°         | 13681                     | 6736      | 570                    |
| 60°         | 20000                     | 6319      | 833                    |
| 50°         | 25712                     | 5712      | 1071                   |
| 40°         | 30642                     | 4930      | 1277                   |
| 30°         | 34641                     | 3999      | 1443                   |
| 20°         | 37588                     | 2947      | 1566                   |
| 10°         | 39392                     | 1804      | 1641                   |
| 0°          | 40000                     | 608       | 1667                   |



Ein Luftteilchen macht sich, dem Druckgefälle in der Höhe folgend, aus niedrigen Breiten (A) polwärts auf den Weg nach B. Wäre es bewegungslos am Ort A geblieben, wäre es einfach mit der Erde mitrotiert und hätte sich nach Ablauf einer bestimmten Zeit am Ort A' befunden.

Auf dem Weg in Richtung Pol behält es diese durch die Rotation vorgegebene Richtungskomponente.

Während das Luftteilchen den Weg A – B zurücklegt hat sich B nach B' weiterbewegt

Da der polwärts liegende Breitenkreis kürzer ist als der äquatorseitige Breitenkreis erfährt das Luftteilchen einen Vorsprung und scheint am Ort Z aus Westen zu kommen.

Die Abbildung ist spiegelsymmetrisch um zu zeigen, dass sich sowohl auf der Nord- als auch der Südhalbkugel eine – nach Osten gerichtete – Westwinddrift ergibt.

Entscheidend zum Verständnis ist, dass wir uns mit

der Erde nach Osten drehen und das wir dabei von Westen, also von hinten her von Luftmassen eingeholt werden, die auf ihrem Weg nach Norden in äquatornäheren Breiten schneller waren als wir es sind...

### Dreht sich die Erde links oder rechts herum?

Vor einigen Jahren gab es im Fernsehen gab es ein Fernsehmagazin dass um Hintergrund eine sich – falsch herum – drehende Erde zeigte. Der Fehler wurde irgendwann bemerkt und korrigiert ohne dass es viele Zuschauer bemerkt haben werden. Nach links oder nach rechts? Gibt es auf diese Frage überhaupt eine Lösung? Wir können den Globus in beide Richtungen drehen und werden feststellen, dass es darauf ankommt, ob man ihn von „oben“ (Nordpol) oder von „unten“

betrachtet: Die Erde dreht sich gleichzeitig nach rechts (im Uhrzeigersinn) und nach links (gegen den Uhrzeigersinn).

Wir sind zwar keine Astronauten, die das Privileg genießen, aus einer ruhenden Perspektive der sich drehende Erde zuschauen zu können. Aber auch auf der Erde finden wir zu einer Antwort:

Die Sonne geht im Osten auf.  
Sie „wandert“ von Osten nach Westen.  
Die Sterne ziehen in der gleichen Richtung über den Himmel.  
Die Sterne drehen sich – auf der Nordhalbkugel - im Laufe eines Tages gegen den Uhrzeigersinn um den Polarstern herum

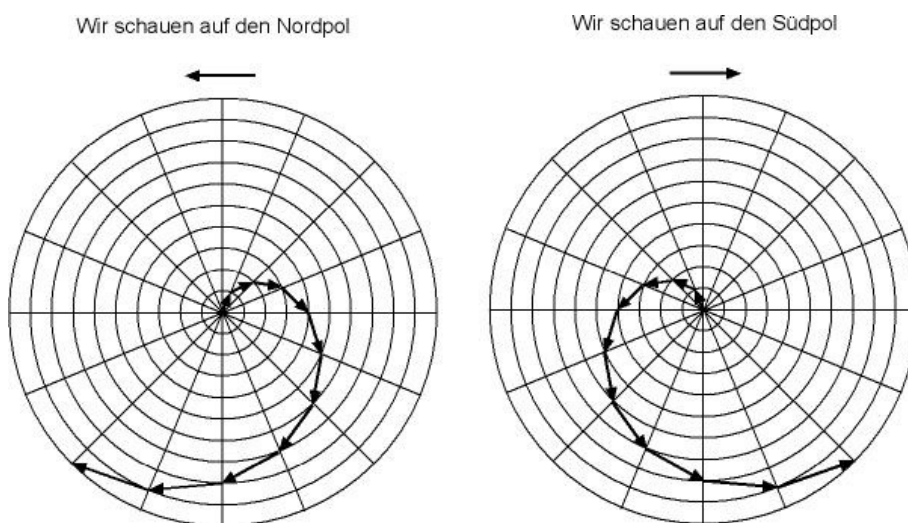
Im Osten geht die Sonne früher auf und unter als im Westen.  
Im Westen geht sie später auf und unter als im Osten.  
Nach Osten zu muss die Uhr vorgestellt werden.  
Nach Westen zu muss sie zurückgestellt werden.

Auf den Globus übertragen heißt die Lösung: Schauen wir auf den Nordpol, dreht sie sich links, also gegen den Uhrzeigersinn. Schauen wir auf den Südpol, so ist es genau andersherum. Dabei gibt es natürlich eine Drehrichtung: In Richtung Osten.

### **Warum driften tropische Wirbelstürme zunächst nach Westen?**

Wirbelstürme entstehen im Bereich der ITC und der Passatwinde. Die Frage warum die Passate nach Südwesten bzw. Nordwesten wehen lässt sich beantworten, wenn wir den Globus langsam drehen gleichzeitig mit einem Stift eine Linie vom Nordpol zum Äquator ziehen. Das Ergebnis ist eine in der Bewegungsrichtung des Stiftes nach rechts gebogene „Linie“. Wiederholen wir das auf der Südhalbkugel so erhalten wir eine nach links gebogene „Linie“.

Wer es scheut, den Globus zu bemalen kann sich mit einem Bierdeckel helfen:  
Man drehe ihn langsam gegen den Uhrzeigersinn und ziehe eine Verbindungslinie zwischen eine Zentrum und Rand. Auch sie wird wieder eine Rechtskurve beschreiben. Das Experiment, auf der Unterseite des Bierdeckels wiederholt, ergibt eine Linkskurve.  
Der Versuch überzeugt auch, wenn man einen Teller senkrecht hält, ihn langsam dreht und mit der Fingerspitze einen Wasser- oder Öltropfen in die Mitte setzt. Der Tropfen rutscht der Schwerkraft folgend nach unten und hinterlässt eine gebogene Spur.





Im Schulbiologiezentrum benutzen wir zur Darstellung der Corioliskräfte einen von einer Handkurbel bewegten Drehteller. Wir ziehen mit einem Pinsel eine Wasserspur vom Zentrum zum Rand. Die Kurven fallen je nach Drehgeschwindigkeit des Tellers und nach der Pinselgeschwindigkeit unterschiedlich aus. Der große Teller zeigt auch sehr deutlich, dass die Coriolisablenkung (Krümmung der Wasserspur) in der Nähe des Zentrums groß und zum Rand hin immer flacher wird.

Die Verhältnisse sind hier sehr vereinfacht dargestellt. Die globale Zirkulation der Atmosphäre ist viel komplizierter was

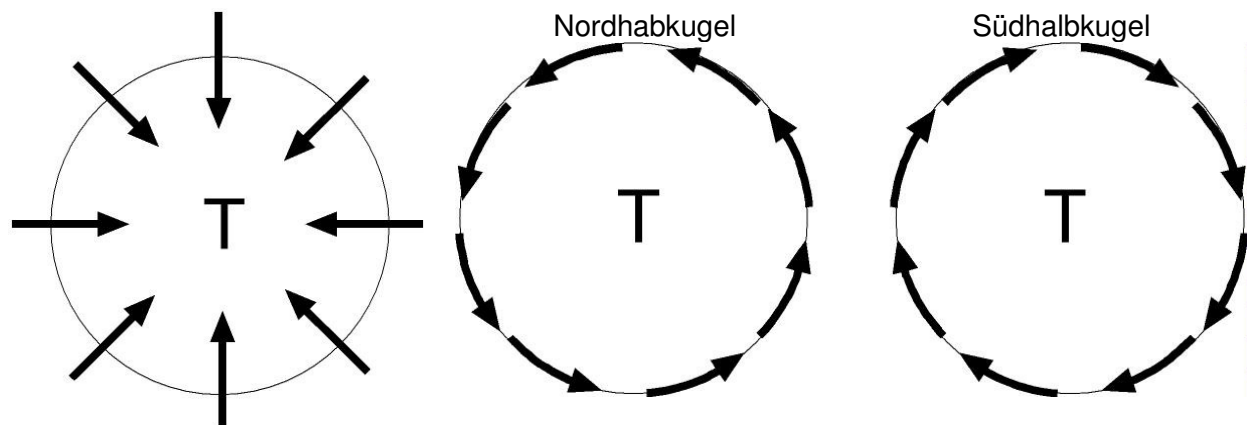
spätestens bei der Betrachtung der weiteren, Osten gerichteten Zugbahn eines tropischen Wirbelsturms deutlich wird.

### Links- oder rechts herum?

Auf der Nordhalbkugel wird jedes bewegte Teilchen durch die Corioliskraft nach rechts abgelenkt, auf der Südhalbkugel nach links.

Ob wir den Teller, den Drehteller oder den Bierdeckel rotieren lassen, stets wird eine vom Zentrum zum Rand gezogene Linie zu einer Rechtskurve. Dies geschieht auch dann, wenn wir die Linie vom Rand zum Zentrum ziehen.

Das hat zur Folge, dass ein Luftteilchen, welches auf einer nicht rotierenden Erde auf direktem Wege, also quer zu den Linien gleichen Luftdrucks (Isobaren) in den Tiefdruckkern hineinströmen würde nach rechts beziehungsweise nach links abgelenkt wird.



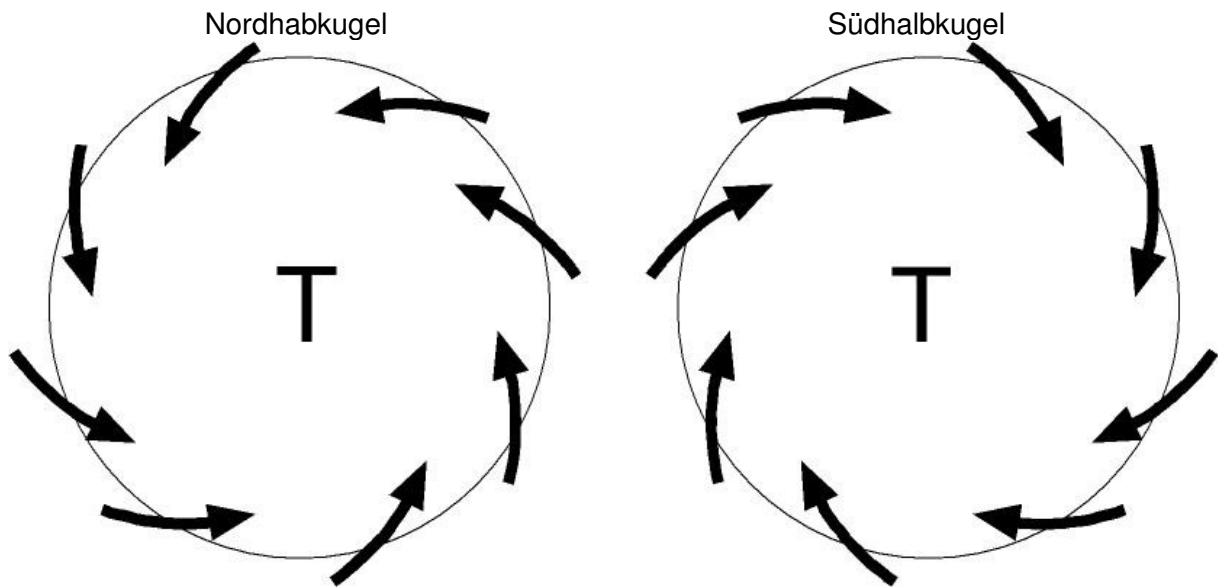
Druckausgleich ohne Corioliskraft (ruhende Erde)

Ablenkung durch Corioliskraft (rotierende Erde)

keine Reibungskräfte: Geostrophischer Wind

Die resultierende, den Tiefdruckkern entlang der Isobaren umströmende Luftströmung wird als geostrophischer Wind bezeichnet. Dieses „Perpetuum mobile“ nur ein Idealkonstrukt. Tatsächlich wird die Windrichtung zusätzlich durch Reibungskräfte bestimmt. Sie geben den rotierenden Luftmassen eine zum Kern gerichtete Komponente. Die Reibung ist in der Höhe schwächer, deshalb bleibt die Rotation dort länger erhalten als in Bodennähe wo sich das Tiefdruckgebiet langsam auffüllt. Dies geschieht über See langsamer als über Land, was entscheidende Konsequenzen für die Entwicklung eines Wirbelsturms hat.



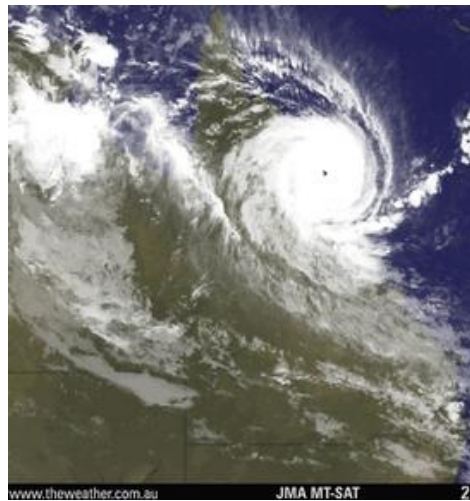


Ablenkung durch Corioliskraft und Reibungskräfte

**Rechts- und linksherum: Wirbelstürme in nördlichen und südlichen Breiten**



Hurrikan Katrina (USA)  
nördliche Hemisphäre: Drehung gegen den Uhrzeigersinn



Hurrikan Larry (Australien)  
südliche Hemisphäre: Drehung im Uhrzeigersinn

**Fahrt gewinnen – Warum der Wirbelsturm stärker wird wenn er sich vom Äquator entfernt**

Die bei den Coriolis-Experimenten auf dem Drehteller erzeugte Spur lässt zum Rand der Scheibe hin eine immer kleiner werdende Krümmung erkennen. Daraus folgt: An den Polen ist Corioliskraft am größten, am Äquator ist sie gleich Null.

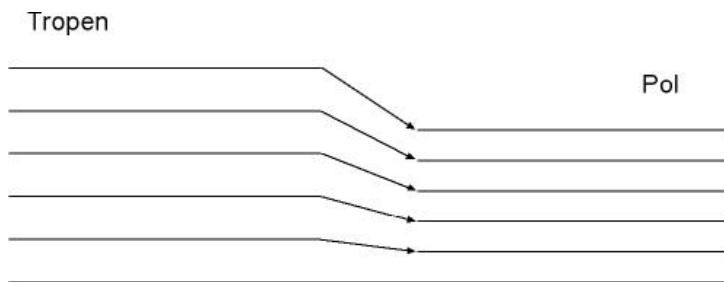
Das ist der wichtigste Grund dafür, dass tropische Wirbelstürme nie den Äquator überschreiten und dass sie erst in subtropischen Breiten ihre zu „Killerstürme“ werden.

### Vom tropischen Wirbelsturm zum „normalen“ Tiefdruckgebiet

Trifft der tropische Wirbelsturm auf Land nehmen die auf ihn am Boden wirkenden Reibungskräfte zu. Dadurch erhält die Windrichtung eine stärker auf den Tiefdruckkern gerichtete Komponente die auch durch die polwärts stärkeren Corioliskräfte nicht kompensiert werden. Da sich seine Wasserdampffracht zugleich schon stark abgerechnet hat und der Nachschub über Land nachlässt verliert er an Dynamik.

Gleichzeitig vollzieht sich ein Kurswechsel in Richtung auf den jeweiligen Pol und schließlich ein Einschwenken in die den ganzen Planeten umspannende Westwinddrift. So wandert ein amerikanischer Hurrikan als abgeschwächtes Tiefdruckgebiet über den Nordatlantik, wechselt nur häufig genug seinen Namen und wird hier meistens gar nicht mehr als Überrest dessen wahrgenommen was noch Tage zuvor die Zeitungen füllte.

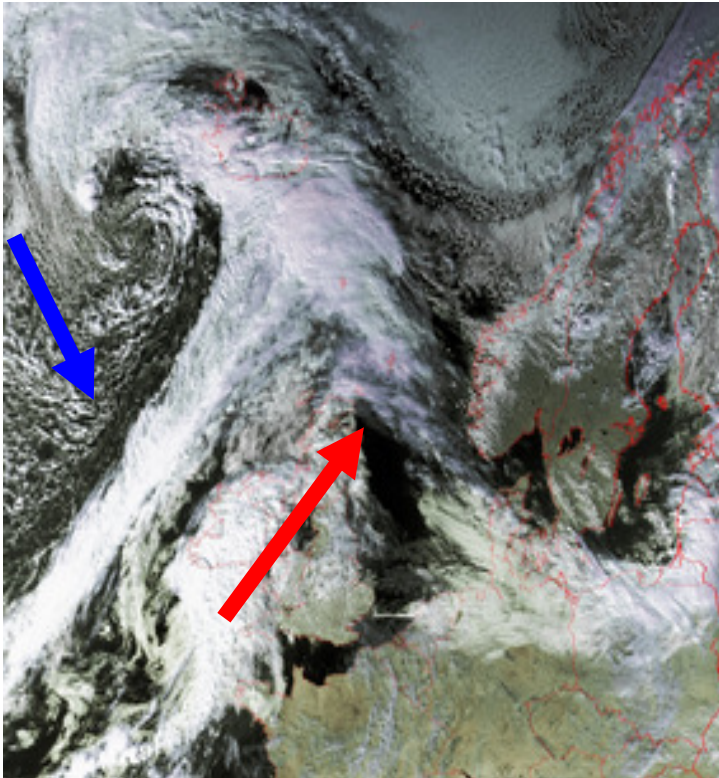
Wie kommt es zu diesem Kurswechsel? Was verursacht die Westwinddrift? Diese Frage ist auch für uns relevant, zieht doch das Wetter bei uns meistens von Westen über uns her.



Die Atmosphäre ragt in den Tropen höher auf als über den Polen. Gewitterwolken stoßen mit ihrem Amboss viel höher an die Stratosphäre und Flugzeuge können höher hinaufsteigen. Linien gleichen Drucks (Isobaren) fallen in mittleren Breiten wie eine Bergflanke ab. Dies hat zur Folge,

dass die höher aufragenden tropischen Luftmassen in der Höhe polwärts abfließen. Da die Erde um ihre Achse rotiert bewirken die Corioliskräfte auf der Nordhalbkugel eine Rechts-, auf der Südhalbkugel eine Linksablenkung. Diese fällt besonders kräftig aus weil Reibungseffekte in dieser Höhe kaum noch vorkommen.

### Zyklone mit Warm und Kaltfront



Das abgebildete Tiefdruckgebiet über dem Atlantik mit dem Zentrum südlich von Island zeigt eine ausgeprägte Warmfront, die sich vom Zentrum bis westlich von Frankreich erstreckt. Die Warmfront bringt feuchte subtropische Luft aus niedrigen Breiten nach Norden. Die warme, feuchte Luft steigt auf, der Wasserdampf kondensiert und es bilden sich Wolken. Warmfronten sind von ausgedehnten Niederschlägen („Landregen“) begleitet. Auf der Rückseite des Tiefdruckgebiets strömt polare Kaltluft von Norden ein. Die Kaltluft schiebt sich unter die wärmere Luft. So bilden sich lokal begrenzte Zellen aufsteigender Luft, verbunden mit Haufewolken (Cumulus) und Schauern. Zwischen den Konvektionszellen sinkt die abgekühlte Luft unter Wolkenauflösung wieder ab.

### Welche Kräfte stecken im Wind?

Wirkt sich doppelte Windgeschwindigkeit doppelt verheerend aus? Oder dreifach? Nein, doppelte Windgeschwindigkeit führt zu einer Verachtfachung der Windenergie! Betrachten wir den Wind als eine senkrecht auf eine Fläche aufschlagende Menge von Luftteilchen. Dann lässt sich das Verhältnis von Geschwindigkeit und Bewegungsenergie so betrachten wie bei einem gegen eine Wand fahrenden Auto.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m v^2$$

$E_{\text{kin}}$  (Bewegungsenergie in Joule),  $m$  (Masse in kg),  $v$  (Geschwindigkeit m/s)

Für ein 50 km/h (50 km/h : 3600 s = 13,9 m/s) schnell fahrendes Auto mit einer Masse von 1000 kg gilt  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 13,9^2 = 193210 \text{ J} = 193,2 \text{ kJ}$ . Eine Verdopplung der Fahrtgeschwindigkeit auf 100 km/h (27,8 m/s) führt zu einer Vervierfachung der Bewegungsenergie:  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 27,8^2 = 772840 \text{ J} = 772840 \text{ kJ}$

Das Gewicht (Masse) eines Kubikmeters Luft beträgt - abhängig von Temperatur, Luftdruck und damit der Dichte  $\rho$  (= rho) etwa  $1,2 \text{ kg/m}^3$

Die Masse ( $m$ ) der Luft ist das Produkt aus der Dichte  $\rho$  (= rho), der Fläche  $A$  ( $\text{m}^2$ ) und der Geschwindigkeit  $v$  (m/s)

$$\text{Aus } m = \rho \cdot A \cdot v \quad \text{und} \quad E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m v^2 \quad \text{folgt} \quad E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot v^2$$

$$\text{Also } E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

### Noch einmal, das Auge des Hurrikans

Nehmen Sie ein Wasserglas und rühren Sie das Wasser darin mit dem Finger kräftig um. Wie tief können Sie den Wasserstand in der Mitte des Glases sinken lassen? Schwappt das Wasser am Rand über?

Sie könnten das Glas auch auf einen Drehteller stellen. Auch dann drängt das Wasser aus der Mitte heraus.

In Hannovers Innenstadt gibt es mit gefärbter Flüssigkeit gefüllte Glaszylinder. Mit einer Kurbel kann das Wasser in Bewegung gebracht werden.

Etwas Puste vorausgesetzt können Sie hier einen richtigen „Wassertornado“ erzeugen!