

### 3 DIE THEMENBLÖCKE DER UNTERRICHTSREIHE

#### 3.1 Themenblock „Wirbel“

	Schritte	Materialien
1.	<p><b>Wirbelstürme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie unterscheidet sich ein Hurrikan von einem Tornado oder einer Zyklone?</li> <li>• Hurrikans Namensgebung Aufbau Entstehung Strömungen im Hurrikan Das Auge des Hurrikan Zugbahnen Steigt durch die Klimaänderung die Wirbelsturmhäufigkeit?</li> <li>• Tornados Entstehung Aufbau Tornados in Deutschland</li> </ul>	<p>Zeitungsausschnitte und Satellitenbilder aus dem Internet. Adresse von meteosat: <a href="http://www.uni-karlsruhe.de/~bh28/metbest.html">http://www.uni-karlsruhe.de/~bh28/metbest.html</a></p> <p><b>Demonstrationen zur Corioliskraft:</b> Drehtisch, Kreide, verschiedenfarbige Vektorpfeile aus Pappe, Globus oder aufblasbare Weltkugel</p> <p>evtl. Video</p>
2.	<p><b>Wie Wirbel entstehen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wie unterscheidet sich eine rotierende Flüssigkeit von einem rotierenden Festkörper?</li> <li>• Hohlwirbel</li> <li>• Die Helmholtzschen Wirbelsätze</li> </ul>	<p><b>Versuch „Wasserwirbel“:</b> 2-Liter-Becherglas, Magnetrührer, Tinte, Pipette, Streichholzköpfe, Kreisel</p> <p><b>Alternativversuch „Tornado-Rohr“:</b> 2 Plastikcolaflaschen, Verbindungsstück „Tornadorohr“ (Physikboutique, Pf: 1852, 85318 Freising) oder Gartenschlauch (Innendurchmesser: 2,5 cm), <math>\frac{3}{4}</math> “ Dichtungsring, Konfetti, Streichholzköpfe</p> <p><b>Versuch „Ringe in Luft“:</b> Wirbeltrommel oder selbstgebaute Wirbeltrommel aus Espressodose oder Blumentopf, Plastiktüte, Gummiringe</p> <p>Rauchmacher: Salzsäure und Ammoniak oder Zigarette</p> <p><b>Versuch „Ringe in Wasser“:</b> Schüssel (möglichst weiß oder aus Glas), Pipette, Kalium-Permanganat-Lösung</p> <p><b>Versuch „Kaskade“:</b> mind. 50 cm hohes Glas, Tinte, Pipette</p> <p><b>Versuch „Helmholtz-Wirbel“:</b> Schüssel wie oben, Tinte, Löffel</p>

### 3.1.1 Wirbelstürme

#### VORBEMERKUNGEN

Schon seit geraumer Zeit haben Wirbelstürme in den Medien Hochkonjunktur, noch nie war das Thema so aktuell. Der Grund für dieses Interesse ist die erhöhte Häufigkeit und Zerstörungskraft mit der diese Stürme auftreten: So wurden z.B. im Jahr 1995 19 tropische Wirbelstürme, davon 11 Hurrikans allein im Atlantik registriert (Mündliche Auskunft von Herrn Pöttger, Wetteramt Hamburg). Diese Anzahl ist weit überdurchschnittlich und wurde nur im Jahr 1933 mit 21 Wirbelstürmen übertroffen.

Verschiedene öffentliche und private Fernsehsender strahlten in letzter Zeit Wissenschaftssendungen zum Thema „Wirbelstürme“ aus. Ein weiterer Grund für die Popularität des Themas ist der Spielfilm „Twisters“ von Steven Spielberg, der sich auf spektakuläre Art und Weise mit Tornados befasst und dadurch ein sehr großes Publikum, vor allem Jugendliche erreicht. Zusätzlich sind in verschiedenen populärwissenschaftlichen Zeitschriften Artikel zum Thema erschienen, die zum Teil sehr aufwendige Schaubilder und herausragende Photographien zeigen. Diese Artikel sind gut verständlich und eignen sich ausgezeichnet für Referate und Hausarbeiten (z.B. SNOW 1984; DAVIS-JONES 1996; MILLER 1987; JACOB 1993; NASH 1996).

Zusätzliche Literatur zur Wirbelentstehung und zum Wirbelaufbau: SCHADE 1980; FABER 1995; ACHESON 1990.

#### LEHR- UND LERNZIELE

Die Schülerinnen, Schüler und Studierenden sollen

- verschiedene Wirbelsturmarten unterscheiden lernen, um Berichte in den Medien einordnen zu können.
- angeregt werden, einzeln oder in Gruppen zu recherchieren. Zu diesem Thema existiert eine Materialfülle, von den Printmedien über das Internet bis zu Fernsehübertragungen.
- die Entstehungsbedingungen und den Aufbau von Wirbelstürmen kennen lernen.
- mögliche Zusammenhänge zwischen Klimaänderungen und dem gehäuften Auftreten von Wirbelstürmen erkennen.

## AUSFÜHRUNG

**Wie unterscheidet sich ein Hurrikan von einem Tornado oder einer Zyklone?**

	<b>Hurrikan/ Taifun</b>	<b>Tornado</b>	<b>Zyklone/ Tiefdruckgebiete</b>
<b>Erscheinungsgebiete</b>	<u>Hurrikan</u> : Amerika, Karibik, Golf von Mexiko. <u>Willy-Willy/ Zyklon</u> : Australien. <u>Taifun</u> : Asiatischer Raum (China, Japan, Philippinen).	In allen Teilen der Erde.  Am häufigsten in den Great Plains, die von Texas bis Kanada reichen.	Tief- und Hochdruckgebiete in mittleren Breiten.
<b>Entstehungsbedingungen</b>	Bilden sich über warmen Ozeanen. Mindestwassertemperatur: 26°C. Ab dem 10. Breitengrad.	Bilden sich über Land, wenn kalte, trockene über warme, feuchte Luftmassen strömen, d.h. z.B. in Gewitterwolken.	Können sich aus Hurrikans bilden.
<b>Durchmesser</b>	ca. 500-1000 km.	ca. 50-500 m.	mehrere 1000 km.
<b>Lebensdauer</b>	mehrere Tage.	wenige Stunden.	mehrere Tage bis Wochen.
<b>Durchschnittliche Windgeschwindigkeit</b>	bis zu 300 km/h.	bis zu 500 km/h.	ca. 80 km/h.

Tabelle 1.1: Charakteristika von Hurrikan, Tornado und Zyklone

**Hurrikans und Taifune**

Diese Wirbelstürme besitzen die gleichen Erscheinungsbilder: Es handelt sich um Wirbel mit großem Querschnitt, deren Durchmesser zwischen 500 km und über 1000 km liegt. Da sie in verschiedenen Gebieten der Erde auftreten, ist ihre Bezeichnung ortsabhängig: Wirbelstürme, die sich über dem Atlantik, vor allem über dem Golf von Mexiko und der Karibik bilden, werden Hurrikans genannt. Taifune entstehen über dem Stillen Ozean, vor allem vor China, Japan oder den Philippinen. In Australien nennt man die Wirbelstürme „Willy-Willies“ oder „Zyklone“, während man in anderen Gebieten der Erde Tief- und Hochdruckgebiete als Zyklone bezeichnet.

Das Wetteramt in Hamburg zählt Winde ab Windstärke 8 (70 km/h) zu den „tropischen Stürmen“, erst ab Windstärke 12 (ab ca. 120 km/h) werden sie „Hurrikan“ genannt.

Die Bezeichnung „Hurrikan“ stammt von dem indianischen Wort für Sturm „huracan“ ab, Taifun vom chinesischen Begriff „tai fung“, übersetzt „Wind der schlägt“.

Die **Namensgebung für Hurrikans** erfolgt nach Alphabet: Hurrikans, die im Laufe eines Jahres auftreten, erhalten Namen in alphabetischer Reihenfolge. Die Namenslisten werden schon lange vorher festgelegt. Bis 1970 wurden nur Mädchennamen vergeben, seither werden männliche und weibliche Namen abgewechselt.

Hurrikans, Taifune und Zyklonen können nur in einem ganz begrenzten geographischen Bereich entstehen und zwar ungefähr zwischen dem 10. und dem 15. Grad nördlicher und südlicher Breite. Dort sind die Meere warm genug, um die Wirbelstürme mit Energie zu versorgen. In der direkten Umgebung des Äquators, unterhalb des 5. Breitengrads, können sich keine Wirbelstürme ausbilden, da in diesem Gebiet die „Corioliskraft“, die die Winde auf eine Spiralbahn zwingt, zu gering ist.

### Wie ist ein Hurrikan aufgebaut?

Das Internet erlaubt es, im Unterricht aktuelle Satellitenaufnahmen von Wirbelstürmen einzusetzen. Sie erhalten Aufnahmen von Meteosat unter folgender Adresse:

**<http://www.uni-karlsruhe.de/~bh28/metbest.html>**

In den meisten Satellitenaufnahmen werden geographische Grenzen eingezeichnet, so daß mit ihrer Hilfe die Größe eines Wirbelsturms abgeschätzt werden kann.

Abbildung 1.1 zeigt den Hurrikan Emily vor der Ostküste der USA am 31. August 1993. Sowohl das wolkenfreie Auge in der Sturmmitte, als auch die Drehrichtung des Wirbels ist

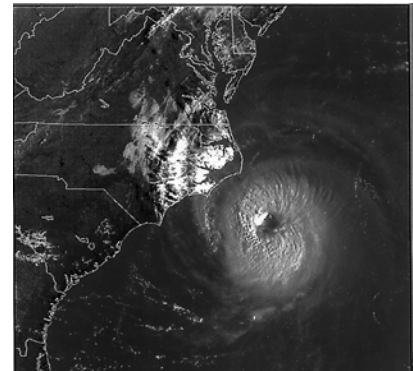


Abb 1.1: Hurrikan „Emily“ NOAA-Satellitenaufnahme 31.8.1993

deutlich erkennbar. Die eingezeichneten Linien stellen die Grenzen der Bundesstaaten Virginia, North- und South-Carolina dar, mit deren Hilfe die ungefähre Ausdehnung des Hurrikans bestimmt werden kann: Sein Durchmesser beträgt ca. 600 km, der des wolkenfreien Auges ca. 80 km.

### Wie entsteht ein Hurrikan oder Taifun?

Voraussetzungen für die Entstehung eines Hurrikans:

1. Die Corioliskraft muss groß genug sein, damit ein Wirbel entsteht.
2. Die Meerestemperatur muss über 26°C liegen.
3. Auf Meereshöhe muss ein Tiefdruckgebiet, eine sog. Konvergenzzone, vorhanden sein.

Bei allen großräumigen Strömungen in der Atmosphäre, wie der Ausbildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten und Wirbelstürmen, aber auch bei Strömungen in Gewässern, spielt die Corioliskraft eine bedeutende Rolle.

Luftmassen in der Atmosphäre strömen immer von Gebieten hohen Luftdrucks zu Gebieten niedrigen Drucks. In einem unbeschleunigten Bezugssystem wäre die Bahn der Luftteilchen

geradlinig. Die Erde aber ist ein rotierendes, also beschleunigtes Bezugssystem. Sie dreht sich mit konstanter Geschwindigkeit. Durch die Rotation ändert jedes bewegte Teilchen auf der Erde ständig die Richtung und erfährt damit eine Beschleunigung. Wo eine Beschleunigung auftritt, muss eine Kraft wirken.

**Demonstration:** Drehtisch oder -schemel langsam rotieren lassen und mit einem Stück Kreide in direkter Linie von außen nach innen oder von innen nach außen zeichnen.

Für Beobachter außerhalb des rotierenden Bezugssystem ist die Bahn der Kreide eine Gerade zur Schemelmitte oder von der Mitte zum Rand. Die gezeichnete Kreidespur zeigt aber eine Linie, die von der Geraden abweicht und an der Schemelachse vorbeiführt. Der Schemel dreht sich unter der Kreide hindurch.

Übertragen auf eine Luftströmung heißt das: Auf der Nordhalbkugel wird sie im Laufe ihrer Bewegung relativ zur Windrichtung nach rechts abgelenkt. Die Kraft, die die Luftströmung senkrecht zur Windgeschwindigkeit und senkrecht zur Drehachse beschleunigt, ist die sog. „Corioliskraft“. Auf der Südhalbkugel wird die Luftströmung dementsprechend nach links abgelenkt.

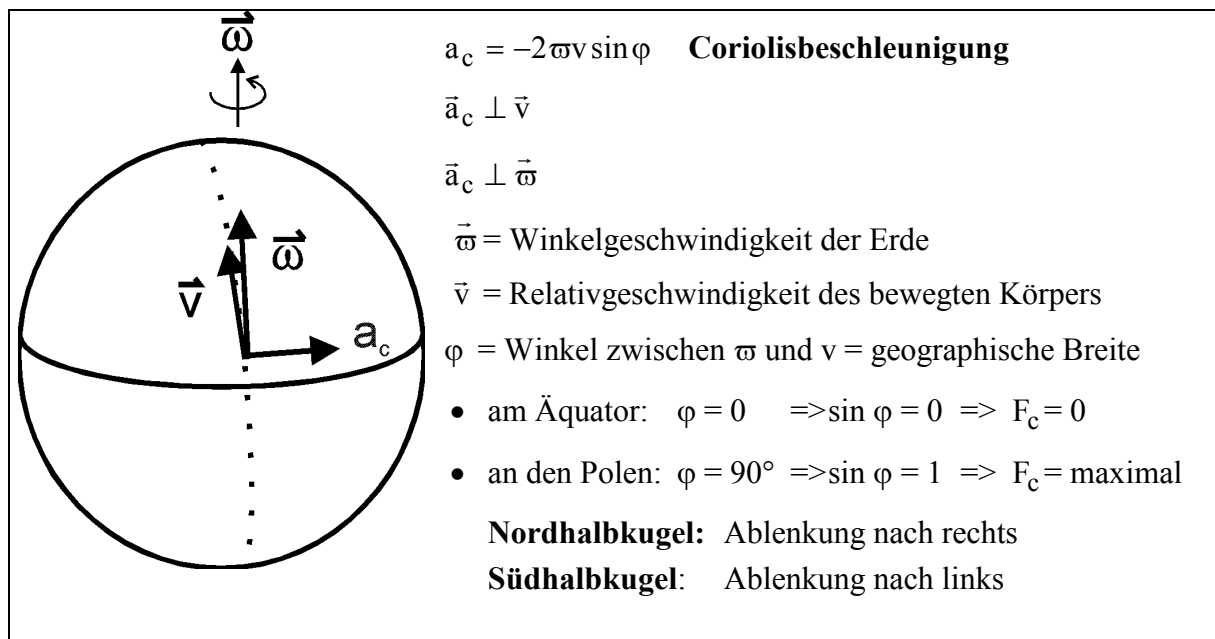


Abb 1.2: Zur Corioliskraft

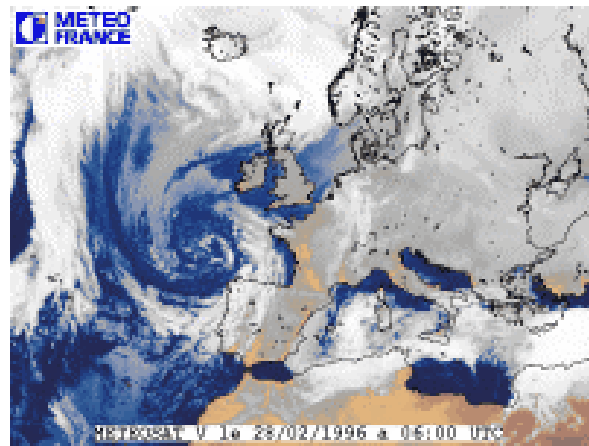
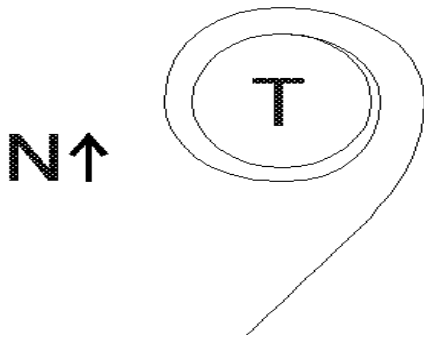
Der Sinusterm beschreibt die Abhängigkeit der Corioliskraft von der geographischen Breite: Am Äquator verschwindet die Corioliskraft, da die Richtung der Strömungsgeschwindigkeit und die Drehrichtung der Erde zusammenfallen. An den Polen stehen Geschwindigkeit und Drehrichtung senkrecht aufeinander, die Corioliskraft wird maximal.

**Demonstration:**

Anhand eines Globus oder einer aufblasbaren Weltkugel kann die Abhängigkeit der Corioliskraft von der geographischen Breite demonstriert werden. Verschiedene farbige Vektorpfeile symbolisieren die Vektoren. Die Variation des Winkels zwischen der Relativ- und der

Winkelgeschwindigkeit mit der Änderung des Breitengrads wird bei einem dreidimensionalen Modell sehr viel deutlicher als an der Tafel. Noch einprägsamer wird die Rechts- und Linksablenkung demonstriert, wenn man den Globus oder eine beliebige Kugel um ihre Achse rotieren lässt und, ähnlich wie beim Drehschemel, mit einem Stift geradlinig über die Oberfläche zeichnet.

Weshalb sind die Luftwirbel auf der Nordhalbkugel linksdrehend, wie die meteosat-Aufnahme in Abbildung 1.3 zeigt? Die vom Hoch- zum Tiefdruckgebiet strömende Luft wird durch die Corioliskraft relativ zur Strömungsrichtung nach rechts abgelenkt. Sie strömt also zunächst am Zentrum des Tiefdruckgebiets vorbei. Der niedrige Druck im Zentrum sorgt aber dafür, dass die Luftmassen abgelenkt werden und spiralförmig ins Tiefdruckgebiet einströmen. Es entsteht auf der Nordhemisphäre ein linksdrehender, auf der Südhemisphäre dementsprechend ein rechtsdrehender Wirbel.

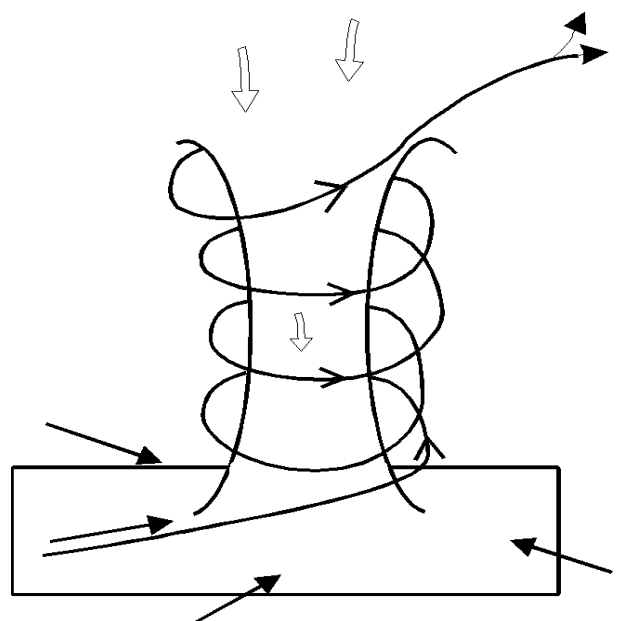


### Strömungen im Hurrikan

Abb. 1.3: Linksdrehender Wirbel auf der Nordhemisphäre

In Abbildung 1.4 symbolisieren die schwarzen Pfeile feuchte und warme Luftmassen, die in ein Tiefdruckgebiet auf Meereshöhe einströmen. Da sie wärmer und damit weniger dicht sind als die Luft in höheren Schichten, steigen sie nach oben. Dabei strömen die warmen, wasserdampfreichen Luftblasen durch kühlere Schichten, der Wasserdampf kondensiert und es regnet. Wenn gasförmiges Wasser in die flüssige Phase übergeht, wird Kondensationswärme frei. Diese Energie beschleunigt die Luft noch weiter, in Höhen bis zu 15 km. In diesen großen Höhen fließt die nun trockene Luft nach außen ab.

Abb 1.4: Strömungen in einem Hurrikan



Währenddessen strömt immer mehr warme Meeresluft in niedrigen Schichten zum Zentrum nach und steigt dort spiralig auf. Die „Maschinerie“, die den Wirbelsturm antreibt, ist angeordnet. Ihre Energiequelle ist die Wärmeenergie der einströmenden Luft.

Meteorologen haben abgeschätzt, dass die kinetische Energie eines Hurrikans etwa  $10^{10}$  kWh beträgt. Im Vergleich liegt die kinetische Energie der Atombombe, die Nagasaki zerstörte, mit etwa  $10^7$  kWh um drei Größenordnungen niedriger (BATTAN 1961).

### Das Auge des Hurrikans

Das Zentrum des Hurrikans mit einem Durchmesser von bis zu 100 km wird „Auge“ genannt. Das Auge ist ein Tiefdruckgebiet. Der niedrige Druck bewirkt, dass von großen Höhen trockene Luft eingesogen wird, die bis auf Meereshöhe absinkt. In Abbildung 1.4 ist diese absinkende Luft durch weiße Pfeile dargestellt. Da die in der Luft enthaltenen Wassertropfchen beim Absinken in wärmere Lagen verdunsten, ist das Auge wolkenlos.

Im Auge kann der Druck um bis zu 10%

des Normaldrucks erniedrigt sein. Dieser Wert entspricht in etwa den Schwankungen des Drucks bei einem Wetterwechsel oder dem Druckunterschied zwischen Meereshöhe und 800 Höhenmeter. Unter der Annahme, dass der Normaldruck dem Druck einer Wassersäule von 10 m Höhe entspricht, hat die Erniedrigung des Drucks im Auge des Hurrikans um 1/10 des Normaldrucks zur Folge, dass der Wasserspiegel im Auge um 1m steigt. Gemeinsam mit starken Winden, die außerhalb des Auges wüten, können hohe Wellenberge entstehen. Sie verursachen vor allem in tiefliegenden Gebieten wie den Anrainerstaaten um den Golf von Bengalen verheerende Überschwemmungen. So ertranken 1991 während eines Hurrikans in Bangladesh 138.000 Menschen.

Auf dem Land bietet das Auge eine Ruhepause nach und vor den schweren Stürmen. Ein Augenzeuge berichtet: „Dann folgten einige Stunden atemloser Windstille. Sie schienen anzudeuten, dass der Wirbelsturm vorübergezogen sei. Die Sturmpause dauerte drei Stunden. Die unnatürliche, nur gelegentlich von Nieselregen gestörte Ruhe barg die Vorahnung einer drohenden Gefahr in sich. Da noch keine Windänderung eingetreten war, machten sich die Erfahrenen auf das Schlimmste gefasst.“ (BATTAN 1961; TANNEHILL 1954)

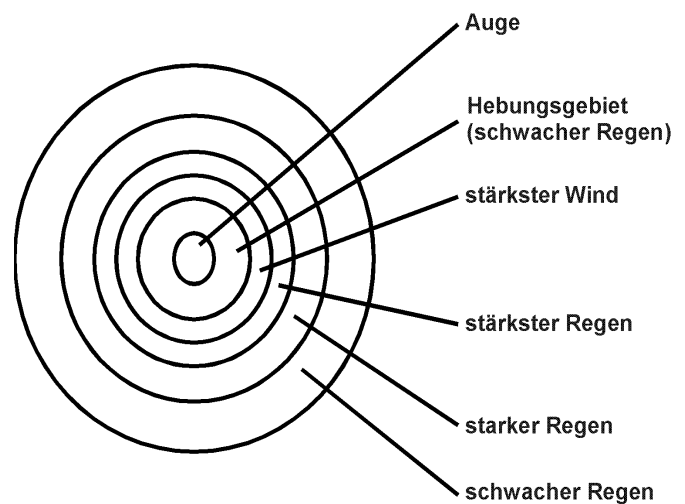


Abb 1.5: Niederschlagsverteilung in einem Hurrikan

## Zugbahnen

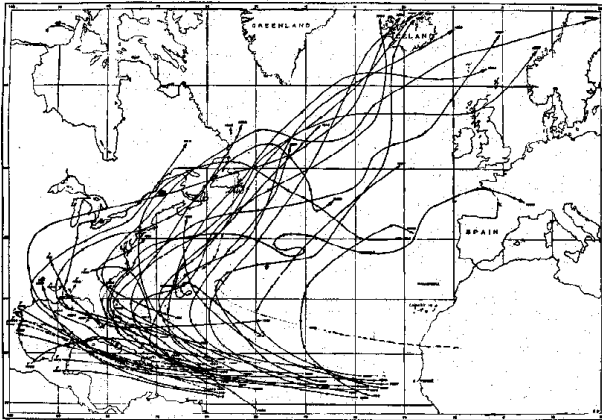


Abb 1.6: Zugbahnen der Hurrikans von 1887 bis 1923 (LILJEQUIST 1994, 296)

Hurrikans bilden sich in tropischen Gebieten und ziehen dann in höhere Breiten. Die genauen Bahnen lassen sich nicht vorhersagen, aber im statistischen Mittel bewegen sich die Hurrikans mit den Hauptwinden, wie den Passaten und dann den Westwinden in höheren Breiten (Abbildung 1.6). Feuchtwarme Meeresluft hält die Hurrikans am Leben. Sobald sie kältere Regionen erreichen, verwandeln sie sich in gewöhnliche Tiefdruckgebiete, die dann in unseren Breitengraden für heftigen

Regen mit starken Winden sorgen. Bei den Herbststürmen im Oktober 1996, die vor allem an der Küste von Cornwall in Großbritannien, aber auch in Deutschland wüteten, handelte es sich z.B. um Ausläufer des Hurrikans „Lily“.

Wenn der Hurrikan in niedrigeren Breiten auf Land trifft, kann er verheerende Schäden anrichten. Allerdings schwächt er sich an Land ab, da er von seiner Energiequelle, der feuchten Meeresluft, abgeschnitten ist. Auch die erhöhte Reibung an Land sorgt für eine zusätzliche Abschwächung.

### Steigt durch die Klimaänderung die Wirbelsturmhäufigkeit?

In diesem Jahrhundert nahm die globale Durchschnittstemperatur um  $0,3^{\circ}$  bis  $0,7^{\circ}\text{C}$  zu. Auch die Meere erwärmten sich in den letzten 40 Jahren um  $0,4^{\circ}$  bis  $0,6^{\circ}\text{C}$ . So gering diese Werte scheinen, so verheerend können die Auswirkungen sein, denn der Wasserdampfgehalt über dem Pazifik stieg durch die globale Erwärmung um 20%, in Äquatornähe sogar um 30%. Das hat zur Folge, dass sich dadurch die Bereiche, in denen Hurrikans entstehen können, um 15% vergrößerten.

Modellrechnungen besagen, dass neben der Häufigkeit auch die Stärke der Wirbelstürme mit der Erwärmung zunehmen kann. Jedes Jahr wächst der Kohlendioxidausstoß um 0,5%. Verschiedene Prognosen besagen, dass bei Verdoppelung des Kohlendioxidausstoßes die Stärke von Orkanen um das 1,5-fache steigt. So werden für  $27^{\circ}\text{C}$  warmes Wasser Maximalgeschwindigkeiten von ca. 280 km/h berechnet, für  $34^{\circ}\text{C}$  warmes Wasser allerdings schon Maximalgeschwindigkeiten von 380 km/h. Die Anzahl der Wirbelstürme würde sich nach diesen Klimamodellen mehr als verdoppeln (Persönliche Mitteilung Prof. Schönwiese, Universität Frankfurt/M., JACOB 1993).

Andere Modelle gehen nicht von einer erhöhten Wirbelsturmhäufigkeit aus, da sich neben den tieferen Schichten der Atmosphäre auch die höheren Schichten erwärmen und es damit zu keinen relevanten Druckunterschieden kommt.



## **Tornados**

Mit 50 - 500 m haben Tornados einen um drei Größenordnungen geringeren Durchmesser als Hurrikans. Dadurch sind die geschädigten Landstriche räumlich begrenzter als bei Hurrikans oder Taifunen. Beispielsweise ist es möglich, dass ein Tornado nur die Häuser auf einer Straßenseite zerstört, während die Häuser der anderen Seite unversehrt bleiben. Allerdings sind die Windgeschwindigkeiten eines Tornados mit bis zu 500 km/h wesentlich höher als die eines Hurrikans. Dadurch sind die Schäden in den kleinen betroffenen Gebieten meist verheerender.

Tornados entstehen auf Land und treten sehr viel häufiger auf als Hurrikans. Allein im Mai 1995 wurden in den USA 484 Tornados gezählt. Dabei wurden 16 Menschen getötet. Der Sachschaden betrug mehrere Millionen Dollar (SNOW 1995).

Neben den hohen Windgeschwindigkeiten verursacht auch der niedrige Druck im Zentrum des Tornados die hohen Schäden. Wenn z.B. ein Tornado über Gebäude fegt, fällt der Druck schlagartig um etwa 10%. Im Gegensatz zum Wirbelsturminnen herrscht in den Gebäuden ein Überdruck, sie „explodieren“ regelrecht. Von Augenzeugen wurde berichtet, dass Fensterscheiben durch den Druckunterschied nach außen gebogen und der Vorhang durch den Unterdruck nach außen gesogen wurde. Nachdem der Tornado vorbeigezogen war, sprang die Scheibe wieder auf ihren alten Platz zurück und klemmte dabei den Vorhang ein.

### **Wie entsteht ein Tornado?**

Voraussetzungen für die Entstehung eines Tornados:

1. Die Atmosphäre muss instabil geschichtet sein.
2. Es müssen Scherströmungen auftreten.

Tornados entstehen im Gegensatz zu Hurrikans auf dem Festland. Sie können in allen Erdteilen auftreten, am häufigsten werden sie aber im sog. „Tornadogürtel“, der von Texas über Kansas und Illinois nach Kanada reicht, gezählt.

Tornados können, ähnlich wie Hurrikans nur dann entstehen, wenn warme, feuchte Luft in den unteren Lagen unter kalter, trockenerer Luft geschichtet ist. In den zentralen Regionen der USA ist diese Voraussetzung besonders häufig erfüllt: Vor allem im Frühjahr treffen hier polare Luftmassen auf feuchtwarme tropische Luft. Warme Luft steigt auf und bildet riesige Gewitterwolken. In den Aufwinden dieser Gewitter können Tornados entstehen.

Welche Kräfte die Luftmassen beim Tornado auf eine Sprialbahn lenken, ist immer noch nicht vollständig geklärt. Viele Quellen behaupten, die Aufwinde würden wie beim Hurrikan durch die Corioliskraft auf eine Sprialbahn gezwungen. Dagegen spricht jedoch die Beobachtung, dass etwa jeder zehnte Tornado im Uhrzeigersinn läuft, während sich die anderen wie Hurrikans zyklonal, d.h. im Gegenuhrzeigersinn drehen. Dies deutet darauf hin, dass die Rotation eine andere Ursache haben muss.

Neuere Untersuchungen gehen davon aus, dass es zwei Mechanismen gibt, die für die Rotation der Tornados verantwortlich sind. Beide beruhen auf Scherströmungen der auftretenden Winde. Auf die Entstehung von Wirbeln durch Scherströmungen wird im nachfolgenden Unterrichtsteil noch genauer eingegangen.

### Scherung durch unterschiedliche vertikale Windgeschwindigkeiten

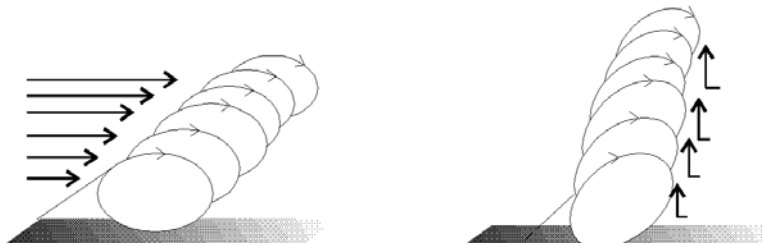


Abb 1.7.: Entstehung und Aufrichtung eines Wirbelschlauchs

Der erste Mechanismus ist in Abbildung 1.7 dargestellt, er geht von vertikalen Winden aus, die mit unterschiedlicher Geschwindigkeit strömen: Am Boden wehen sie schwächer als in höheren Schichten. Dadurch entsteht ein Wirbelschlauch, der sich um die horizontale Achse dreht, ähnlich einem Windrad, das oben stärker angeblasen wird als unten. Starke Aufwinde in der Gewitterzone können dann den Wirbelschlauch in die vertikale aufrichten, es entsteht eine spiralförmige Aufwärtsbewegung (SNOW 1995; DAVIES-JONES 1995; NASH 1996).

### Scherung durch unterschiedliche Windrichtungen

Strömen Winde verschiedener Richtung aneinander vorbei, entstehen an den Grenzflächen vertikale Wirbel. Diese Wirbel werden durch die Strömung der Winde, ähnlich wie ein Kinderkreisel weiter angetrieben. Im Wirbelschlauch halten sich die Druckkraft im Inneren und die Zentrifugalkraft der rotierenden Luftteilchen gerade die Waage, es herrscht ein sog. „zyklotropisches Gleichgewicht“.

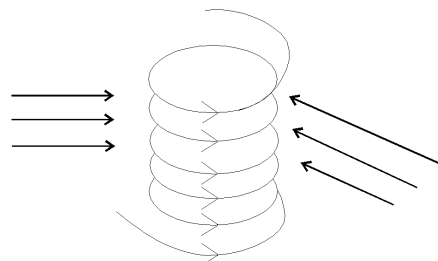


Abb 1.8: Entstehung eines Wirbelschlauchs durch verschiedene Windrichtungen

Die Luftteilchen bewegen sich nicht in radialer Richtung, es treten von der Seite weder Luftelemente ein noch aus. Lediglich am Boden wird die Luft in den Schlauch gesogen. Hier herrscht ein so starker Sog, dass durch den Tornado auch schwere Gegenstände, wie Autos, gehoben werden können.

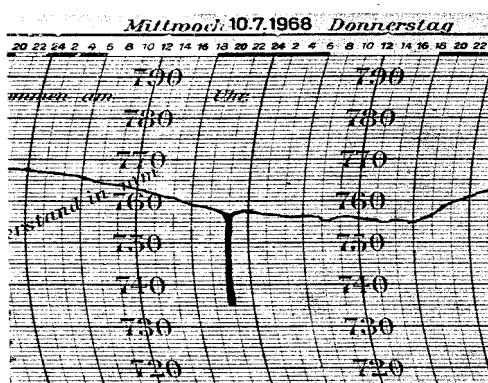
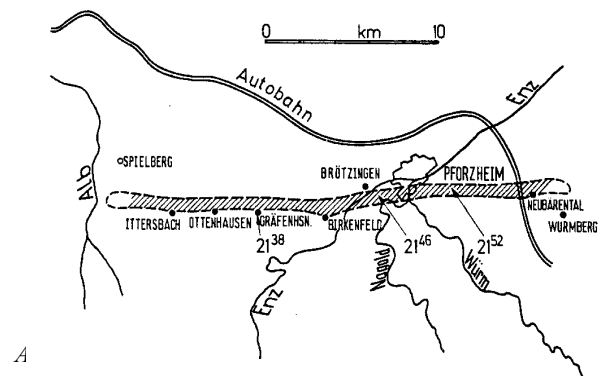
## Aufbau eines Tornados

Tornados besitzen eine ähnliche Struktur wie Hurrikans: Ihr wolkenfreies Auge hat natürlich sehr viel kleinere Abmessungen, dennoch ist es vor allem in größeren Tornados durchaus erkennbar. In diesem Auge ist die Windgeschwindigkeit schwach und es können Abwinde in Richtung Erde strömen. Allerdings gibt es gerade über die Zentren von Tornados kaum Daten, da die Messgeräte die übermäßige Beanspruchung selten überstehen. Die höchsten Windgeschwindigkeiten herrschen in einem Ring nahe der Achse.

## Tornados in Deutschland

Auch in Deutschland können Tornados auftreten. So hat z.B. am 10. Juli 1968 im Raum Pforzheim ein Tornado größere Schäden angerichtet. Auch dieser Tornado hat sich aus Gewitterwolken gebildet. Die „Meteorologische Rundschau“ berichtet: „Am späten Abend des 10.7.1968, eines ungewöhnlich schwülen Tages, ist ein schwerer Tornado über die nördlichen Ausläufer des Schwarzwaldes hinweg nach Osten gezogen. ... Dass es sich hierbei um einen Tornado gehandelt hat, darüber kann kein Zweifel bestehen. Da es

Nacht war, liegen zwar nur wenige visuelle Beobachtungen vor. Der dunkle Wolkentrichter, dessen unterer Teil hin- und herschwankte, wurde zuverlässig von Süden her aus der Entfernung von wenigen Kilometern bei fahlem, horizontnahe Mondschein beobachtet. ...



wurde auch in Pforzheim beobachtet, dass völlig zerstörte Gebiete und völlig unversehrte sehr dicht beieinander lagen.

Das Barometer eines Studiendirektors aus Pforzheim, das zufällig in der Randzone der Tornadozugstraße stand, zeichnete die Druckerniedrigung beim Vorbeizug des Tornados auf (Abbildung 1.10). Weitere, allerdings schwächere Tornados traten z.B. 1973 in Kiel und 1978 in Recklinghausen und Schwäbisch Gmünd auf.

### 3.1.2 Wie Wirbel entstehen

#### VORBEMERKUNGEN

Wirbel in Wasser oder Luft sind besonders schöne und ansprechende Erscheinungen in der Natur. Deshalb steht in diesem Unterrichtsteil zunächst die phänomenologischen Betrachtung von Wirbelströmungen im Vordergrund. Es werden Wirbel erzeugt und deren Struktur untersucht. Die Experimente sind so konzipiert, dass sie mit einfachsten Mitteln auskommen. Auf die qualitative Beschreibung von Wirbelströmungen folgt die quantitative mit Hilfe der Helmholtzschen Wirbelsätze.

#### LEHR- UND LERNZIELE

Die Schülerinnen, Schüler und Studierenden sollen

- die Schönheit von Wirbeln in der Luft und im Wasser aufs neue kennen lernen. Beim Experimentieren sollen sie den Aufbau und die Entstehung der Wirbel möglichst präzise beobachten und in eigenen Worten beschreiben können.
- angeregt werden, in ihrer täglichen Umgebung auf Wirbelströmungen zu achten und eigene Experimente zuhause durchzuführen.
- die Helmholtzschen Wirbelsätze als qualitative und quantitative Beschreibung von Wirbeln kennen lernen und ihre eigenen Beobachtungen mit dieser Beschreibung in Einklang bringen.

#### AUSFÜHRUNG

##### **Wie unterscheidet sich eine rotierende Flüssigkeit von einem rotierenden Festkörper?**

**Demonstration „Kreisel“:** Der Kreisel rotiert als Ganzes, d.h. alle Teile haben einen festen Abstand zueinander, seine Form bleibt während der Bewegung erhalten.



Abb 1.11: Wasserwirbel

**Demonstration „Wasserwirbel“:** Das Becherglas wird mit Wasser gefüllt. Wird das Wasser durch Rühren von Hand in Rotation versetzt, bringt die Reibung die Bewegung schnell zum Erliegen. Deshalb wird ein Magnetrührer eingesetzt, zunächst mit kleinen Drehzahlen, so dass sich die Wasseroberfläche nur in der Mitte leicht nach unten wölbt. Nach kurzer Wartezeit wird ein Tropfen Tinte eingeträufelt, der den Wasserwirbel allmählich anfärbt und so die Struktur des Wirbels sichtbar macht.

Die Färbung des Wirbels verläuft so gemächlich, dass mit dem bloßen Auge feinste Strukturen erkennbar sind: Zuerst sieht man, dass sich die nach unten absinkende Tinte spiralförmig in fein ziselierten Schichten verteilt, die aneinander vorbeigleiten. Im

Zentrum bildet sich rasch eine schlauchförmige Zone mit kleinem Durchmesser aus, die sich schneller dreht als die äußeren Flüssigkeitsschichten. Um diesen Wirbelkern verteilt sich die Tinte weiter in kreisförmigen Bahnen. Nach einiger Zeit färbt sie auch die äußeren Bereiche des Wirbels an. Bei genauem Hinsehen erkennt man, dass sich die Flüssigkeit umso langsamer dreht, je weiter sie vom Zentrum entfernt ist.

Streichholzköpfe als Schwimmer erleichtern die Beobachtung. Die zweifarbigen Köpfe können auch als Richtungsanzeiger dienen: Werden sie mit etwas Geschick so in die Flüssigkeit gesetzt, dass der Kopf in Strömungsrichtung zeigt, behalten sie ihre Richtung bei, solange sie sich außerhalb des Wirbelkerns bewegen (Abbildung 1.12). Dieses Gebiet außerhalb des Kerns nennt man „drehungsfreies Wirbelfeld“. Sobald der Richtungsanzeiger den Kern erreicht hat, „klebt“

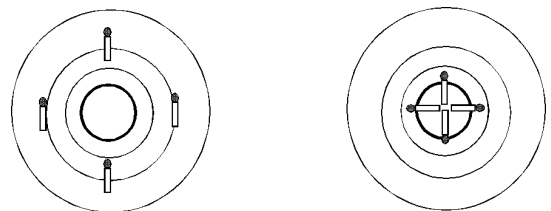


Abb 1.12: Streichholzschwimmer im drehungsfreien Wirbelfeld und im Wirbelkern

ein Ende an der Wirbelachse, während das andere Ende um die Achse rotiert. Beim Wirbelkern handelt es sich um ein drehendes Wirbelfeld.

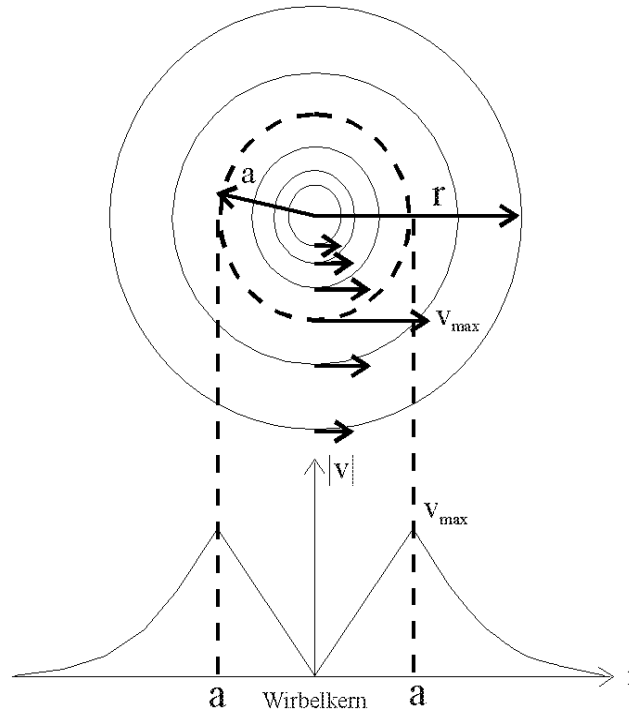


Abb 1.13: Querschnitt durch einen Wirbel

Der schematische Aufbau eines Wirbels ist in Abbildung 1.13 dargestellt: Von der Wirbelachse bis zum Radius  $a$  des Wirbelkerns steigt die Geschwindigkeit  $v$  an, außerhalb des Kerns nimmt sie wieder ab.

Rotierender Festkörper	Rotierende Flüssigkeit
Behält als starrer Körper seine Form bei.	Ändert ihr Aussehen, ihre Gestalt, da Fluidteilchen gegeneinander verschoben werden können.
Alle Elemente rotieren mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit $\omega$ .	<u>Im Wirbelkern</u> rotieren alle Elemente mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit $\omega$ (wie ein Festkörper). Fluidelemente des Kerns vermischen sich nicht mit der umgebenden Flüssigkeit. Der Wirbelkern ist ein drehendes Wirbelfeld. <u>Außerhalb des Kerns</u> nimmt $\omega$ ab, am Gefäßrand wird $\omega = 0$ . Dieses Gebiet ist ein drehungsfreies Wirbelfeld.
$\omega = \frac{v}{r} = \text{konstant}$ : Bahngeschwindigkeit $v$ nimmt mit dem Abstand vom Zentrum <u>zu</u> .	Bahngeschwindigkeit $v$ nimmt außerhalb des Wirbelkerns mit dem Abstand vom Zentrum <u>ab</u> .

Tabelle 1.2: Vergleich eines rotierenden Festkörpers mit einer rotierenden Flüssigkeit

### Hohlwirbel

Wirbeltrichter wie Badewannenwirbel sind wohl die bekannteste Wirbelform im Alltag. Bei diesem Wirbel ist der Strömung in konzentrischen Kreisen um die Wirbelachse eine radiale

Bewegung zur Achse hin überlagert. Um einen Hohlwirbel zu erzeugen, muss lediglich die Drehzahl des Magnetrührers erhöht werden. Im Zentrum des Wasserwirbels bildet sich eine Luftsäule aus, die am Umlauf unbeteiligt ist. Die Flüssigkeit dreht sich wie ein Rohr um eine Achse, dabei zeigt der Wassertrichter eine gleichmäßige spiralförmige Struktur.

### **Alternativversuch „Tornado-Rohr“:**

Hohlwirbel können auch mit Hilfe eines „Tornado-Rohrs“ erzeugt werden. Dazu werden zwei möglichst große Getränkeflaschen mit Hilfe eines Verbindungsstücks miteinander verbunden, das entweder käuflich erworben oder selbst gebastelt werden kann (siehe Materialliste).

Das Verbindungsstück selbst zu basteln ist einfach: Zunächst muss der Durchmesser des Flaschenhalses zusätzlich verengt werden, das geschieht durch einen Dichtungsring, den man zwischen die Flaschen legt. Bei Bedarf, wenn der Wasserwirbel sich immer wieder abschnürt, muss die Öffnung des Rings noch etwas aufgestemmt werden. Die Verbindung der Flaschen erfolgt durch ein etwa 4 cm langes Schlauchstück, das man über die Flaschenhalse zieht. Vorher muss eine Flasche mit Wasser gefüllt werden.

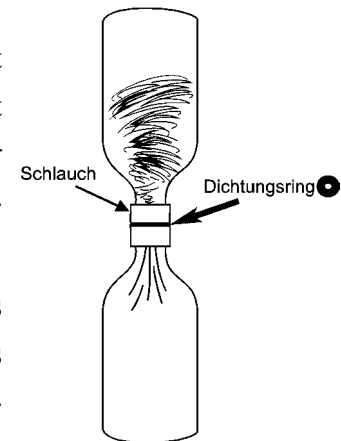


Abb 1.14: Tornado-Rohr

Um einen Wirbel zu erzeugen, werden die Flaschen so gedreht, dass die gefüllte auf dem Kopf steht und sich in die andere entleert. Um den „Tornado“ zu simulieren, muss das Wasser durch kreisförmige Bewegung der Flaschen in Rotation versetzt werden. Es entsteht ein Hohlwirbel. Konfetti oder andere Schwebkörper, die ins Wasser gestreut werden, dienen der Markierung von Flüssigkeitselementen. Mit ihrer Hilfe kann beobachtet werden, dass die Bahngeschwindigkeit zum Zentrum hin rasch zunimmt und die Körper im Zentrum um ihre eigene Achse rotieren.

### **Die Helmholtzschen Wirbelsätze**

1858 veröffentlichte Hermann Helmholtz die nach ihm benannten Wirbelsätze, die Entstehung und Verhalten von Wirbeln beschreiben. Wir beginnen mit dem anschaulichsten Teil dieser „Helmholtzschen Wirbelsätze“, der sinngemäß besagt:

**Ein Wirbel hat nie ein freies Ende innerhalb der Flüssigkeit, sondern nur an Grenzflächen.**

Wirbel enden entweder an der Oberfläche der Flüssigkeit oder an der Gefäßwand, wie z.B. die Wasserwirbel in unseren Versuchen oder auch die Badewannenwirbel. Bei Tornados oder Hurrikans dient als „freie Oberfläche“ eine stabile Luftschicht, die oberhalb der labilen Schicht in über 15 km Höhe liegt. Innerhalb der Flüssigkeit schließt sich der Wirbel zu einem Ring zusammen, wie z.B. die Wirbelringe in der Luft, die man durch Rauchpartikel sichtbar machen kann:

### **Versuch „Wirbelringe in Luft“:**

Um solche Wirbelringe in der Luft selbst zu erzeugen, benötigt man mindestens einen Raucher, der bereit ist, seine Zigarettenpause vorzuverlegen und mit seinem Rauch die Luftringe anzufärben. Gesünder, aber auch aufwendiger färbt man die Ringe mit einem „Rauchmacher“ an, der aus zwei Glaszylindern besteht, die durch Glasröhren so miteinander verbunden sind, dass Luft zuerst in den ersten Zylinder geblasen wird, dann von diesem über den zweiten in den Raum. Wird nun der erste Behälter mit verdünnter Salzsäure, der zweite mit Ammoniak gefüllt, so dass die Salzsäure über den Ammoniak geblasen wird, erhält man einen zähen Rauch, mit dessen Hilfe Luftwirbel sehr gut sichtbar gemacht werden können.

Eine „Wirbeltrommel“ ist schnell selbst gebaut: In den Boden einer Kaffeedose oder einer Waschmitteltrommel wird ein rundes Loch geschnitten, bei einem Blumentopf ist das Loch am Boden schon da. Als „Trommelfell“ dient bei der Kaffeedose der Plastikdeckel; Waschmitteltrommel oder Blumentopf werden mit einer Plastiktüte bespannt.

Um die Rauchringe zu erzeugen, bläst man Rauch durch das Loch in den Behälter und klopft

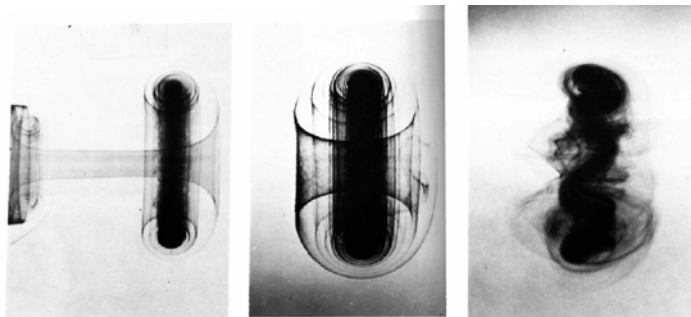


Abb 1.16: Bildfolge: Entstehung eines Wirbelrings (VAN DYKE 1982,66)

### **Alternativversuch „Wirbelringe in Wasser“:**

Dieser Versuch ist noch weniger aufwendig und gesünder als das Luftwirbelexperiment. In eine (möglichst weiße oder Glas-) Schüssel wird Wasser gefüllt. Dann zieht man eine Pipette oder Injektionsspritze ohne Nadel mit Kalium-Permanganat-Lösung auf. Diese Pipette legt man ins Wasser und drückt, sobald sich das Wasser beruhigt hat, kurz auf den Ballon oder den Kolben. Es entstehen kleine Wirbelringe, deren Struktur, Wirbelkern und umgebende kreisförmige Schichten sehr gut sichtbar sind.

**Weil es so schön ist, noch ein Experiment ...**

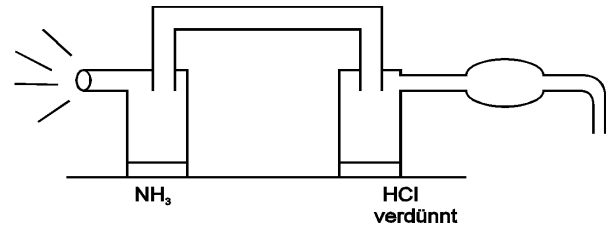


Abb 1.15: Bauprinzip Rauchmacher

sacht mit der Hand auf die Membran. Es entstehen Rauchringe, die gemächlich durch den Raum schweben. Deutlich erkennbar ist die Struktur der Wirbel, es handelt sich um filigrane Gebilde, die aus vielen konzentrischen, um eine kreisförmige Achse rotierenden Schichten bestehen.



**Versuch „Kaskade“:**

Ein hoher Glasbehälter wird eine mindestens eine halbe Stunde vor der Versuchsdurchführung mit Wasser gefüllt, damit es zur Ruhe kommen kann. In das Wasser trüfelt man mit einer Pipette ein Tropfen Tinte. Am Anfang bleibt der Tropfen zusammen, er fällt fast wie ein Festkörper. Dann bildet sich ein Wirbelring aus, der langsam wächst. Nach einiger Zeit wird der Ring instabil, einzelne Segmente lösen sich wie Arme aus dem Ring und bilden neue Wirbel, die dann wieder in viele kleine Wirbel zerfallen. Nach und nach entsteht also eine ganze Wirbelkaskade. D'Arcy Thompson, ein Gestaltforscher, der Anfang dieses Jahrhunderts versuchte, die Formen von Lebewesen durch physikalische Analogien, z.B. durch Strömungsformen zu erklären, beschreibt die Bewegung wie folgt: *"Aus dem sinkenden Tropfen entsteht ein vollständiger Wirbelring, er dehnt sich aus und zieht sich zusammen, er wallt umher, und die absinkenden Schlingen verwandeln sich wieder in neue Wirbel ..."* Diese Wirbelkaskaden vergleicht D'Arcy Thompson mit Quallen und Medusen, deren Gestalt und Form er durch solche Wirbelexperimente zu erklären versucht.

Bei allen diesen Versuchen ist die Ursache der Wirbelentstehung immer die unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit zwischen benachbarten Flüssigkeitsteilchen. Erzeugt wird dieser Geschwindigkeitsunterschied durch den fallenden Tropfen in ruhender Flüssigkeit oder durch die Haftung an einem umströmten Körper.

Der äußere Teil der Strömung bleibt zurück, weil die Fluidelemente am Hindernis haften, während der innere Teil ungehindert weiterströmt. Durch die Reibung der äußeren Elemente des strömenden Fluids an der Umgebungsflüssigkeit bildet sich zunächst ein Farbpilz, dessen Ränder sich durch die in der Mitte rasch nachströmende Farbe immer stärker einrollen, der Wirbel bildet sich aus. Kurze Zeit haftet er noch am Hindernis, dann löst er sich und wandert mit der Strömung.

Diese Versuche zeigen deutlich: Ohne Reibung in der Flüssigkeit und ohne die Haftung zwischen Flüssigkeit und Hindernis könnten keine Wirbel entstehen, aber auch keine Wirbel vernichtet werden. Genau das ist die Aussage des **ersten Helmholtzschen Wirbelsatzes**:

**Ohne Reibung können Wirbel weder erzeugt noch vernichtet werden.**

Auch den **zweiten Helmholtzschen Wirbelsatz** können wir unmittelbar mit unseren Versuchen bestätigen. Er lautet:

**Die Wirbellinien werden immer aus den gleichen Flüssigkeitselementen gebildet.**

Bis sich die Wirbel durch Diffusion und durch Störungen auflösen, wandert der Wirbel „als Ganzes“ durch die umgebende Flüssigkeit. Es tritt weder Flüssigkeit ein noch aus.

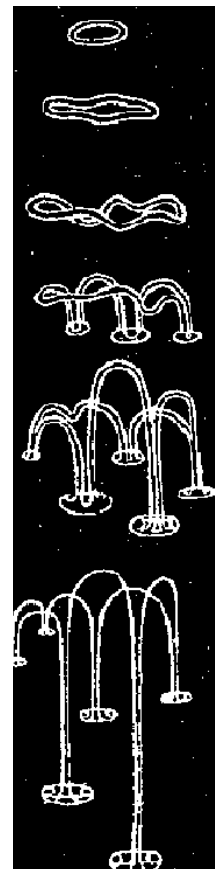


Abb 1.17: Fallender Tropfen (THOMPSON 1983)

Für den **dritten Helmholtzschen Wirbelsatz** muss etwas weiter ausgeholt und eine neue physikalische Größe eingeführt werden: Die „Zirkulation“. Sie ist ein Maß für die Stärke des Wirbels.

Die Einführung der Zirkulation erfolgt ganz analog zu den Wirbelfeldern um stromdurchflossene Leiter. Auch hier entstehen magnetische Feldlinien um den Leiter, die weder Anfang noch Ende besitzen. Der in Abbildung 1.13 schematisierte Wirbel beschreibt so auch die Feldlinien um einen Leiter: Der Radius des Wirbelkerns entspräche dem des Leiters, die Feldstärke  $H$  wäre das Analogon zur Bahngeschwindigkeit auf den Stromlinien. Völlig analog zum Wasserwirbel nimmt auch die Feldstärke  $H$  im Inneren des Leiters zu, während sie außerhalb des Leiters wieder abnimmt.

Zur Berechnung der Zirkulation wird in das Geschwindigkeitsfeld der Wirbelströmung oder einer beliebigen anderen Strömung eine geschlossene Kurve gelegt, die eine beliebige Form haben kann. Diese Kurve wird in infinitesimal kleine Teilstücke zerlegt (Abbildung 1.18). Jedes dieser Teilstücke symbolisiert ein Flüssigkeitselement, das sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  bewegt. Für die Zirkulation wird nun die Geschwindigkeit in jedem Teilstück mit der Länge des Stücks multipliziert und über alle Teilstücke der Kurve summiert. D.h. man berechnet das Wegintegral über die geschlossene Kurve  $C$ :

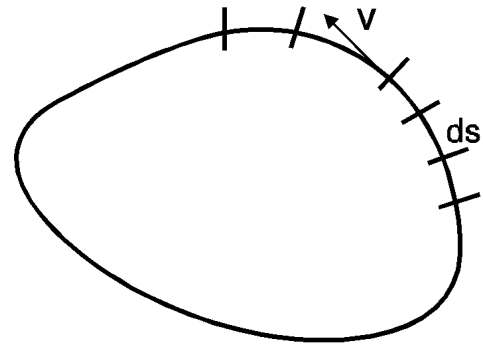


Abb 1.18: Kurve im Geschwindigkeitsfeld

$$\text{Zirkulation } \Gamma = \oint_C \vec{v}(\vec{r}) d\vec{s}$$

### Berechnung der Zirkulation eines idealisierten Wirbels

Annahmen:

- Die Flüssigkeitsteilchen bewegen sich auf konzentrischen Kreisen.
- Die Bahngeschwindigkeit auf jedem Kreis sei konstant, aber sie variere von Kreis zu Kreis.
- Einfachste Wegstrecke: Eine der Kreisbahnen um den Kern.

1. Im Wirbel ist in jedem Teilstück  $\vec{v}$  parallel zu  $d\vec{s}$ . Aus dem Skalarprodukt wird  $\vec{v}d\vec{s} = |\vec{v}||d\vec{s}|\cos\varphi = vds$

$$\Gamma = \oint_C \vec{v}(\vec{r})d\vec{s} = \oint_C v(r)ds$$

2. Auf jedem Kreis ist  $v(r)$  konstant.  $v(r)$  kann vor das Integral gezogen werden.

$$\Gamma = v(r) \oint_C ds$$

3. Das Linienintegral ist gleich dem Kreisumfang.

$$\Gamma = v(r) \int_0^{2\pi} r d\alpha = v(r) 2\pi r$$

Mit  $v = \omega r$  und der Kreisfläche  $A = \pi r^2$ , gilt:

$$\Gamma = v(r) 2\pi r = \omega(r) 2A$$

### Zirkulation eines Wirbels

Über die Zirkulation eines Wirbels besagt das 3. Helmholtzsche Gesetz:

**Die Zirkulation für einen beliebigen Weg, der den Wirbelkern einmal umläuft, ist konstant.**

$$\Gamma = \omega 2A = \text{konstant}$$

Dieser Satz findet bei den Wirbelstürmen eine direkte Anwendung: Verjüngt sich die Querschnittsfläche eines Wirbels, muss sich nach dem 3. Helmholtzschen Satz die Winkelgeschwindigkeit erhöhen, damit die Zirkulation erhalten bleibt. Besonders bei Tornados ist eine Verringerung des Querschnitts und die damit verbundene Erhöhung der Geschwindigkeit gefürchtet, da diese Stürme dadurch besonders zerstörerisch werden.

Mit Hilfe des 3. Helmholtzschen Wirbelsatzes kann nun auch die in Abbildung 1.13 dargestellte Bahngeschwindigkeit im Wirbel erklärt werden:

- Für  $r < a$ :  $\omega = \text{konstant}$ , mit  $v = \omega r$  gilt:  $v \sim r$ .
- Für  $r > a$ :  $\Gamma = \text{konstant}$ ,  $v = \frac{\Gamma}{2\pi r} \sim \frac{1}{r}$ .

Das heißt im Wirbelkern, der wie ein Festkörper rotiert, nimmt die Bahngeschwindigkeit proportional mit dem Radius zu, sie wird am Rand des Kerns maximal und nimmt dann außerhalb mit  $1/r$  ab. Ein Wirbel mit dieser Geschwindigkeitsverteilung wird „Rankinewirbel“ genannt.

Wie bereits gesagt: Die magnetische Feldstärke im Wirbelfeld eines stromdurchflossenen Leiters nimmt analog zur Bahngeschwindigkeit beim Wasserwirbel im Inneren des Leiters zu:  $H \sim r$ . Außerhalb des Leiters nimmt sie umgekehrt proportional zu  $r$  ab:  $H \sim 1/r$ .

In der Originalveröffentlichung seiner Wirbeltheorie formuliert Helmholtz die Wirbelsätze wie folgt:

*„Wirbellinien nenne ich Linien, welche durch die Flüssigkeitsmasse so gezogen sind, daß ihre Richtung überall mit der Richtung der augenblicklichen Rotationsaxe der in ihnen liegenden Wassertheilchen zusammentrifft.*

*Wirbelfäden nenne ich Theile der Wassermasse, welche man dadurch aus ihr herauschneidet, dass man durch alle Punkte des Umfangs eines unendlich kleinen Flächenelements die entsprechenden Wirbellinien konstruirt.*

Die Untersuchung ergibt nun, dass, wenn für alle Kräfte, welche auf die Flüssigkeit wirken, ein Kräftepotential existirt,

1. kein Wassertheilchen in Rotation kommt, welches nicht von Anfang an in Rotation begriffen ist;
2. die Wassertheilchen, welche zu irgendeiner Zeit derselben Wirbellinien angehören, auch indem sie sich fortbewegen, immer zu derselben Wirbellinie gehören bleiben;
3. dass das Produkt aus dem Querschnitte und der Rotationsgeschwindigkeit eines unendlich dünnen Wirbelfadens längs der ganzen Länge des Fadens constant ist und auch bei der Fortbewegung des Fadens denselben Werth behält. Die Wirbelfäden müssen deshalb innerhalb der Flüssigkeit in sich selbst zurücklaufen, oder können nur an ihren Grenzen endigen.“ (HELMHOLTZ 1858, 4-5)

### Versuch „Helmholtz-Wirbel“:

Ganz am Ende seiner Abhandlung beschreibt Helmholtz auch ein Experiment: „Ich bemerke noch, dass man diese Bewegung der kreisförmigen Wirbelringe in der Natur leicht studiren kann, indem man eine halbe eingetauchte Kreisscheibe, oder die ungefähr halbkreisförmige Spitze eines Löffels schnell eine kurze Strecke längs der Oberfläche der Flüssigkeit hinführt, und dann schnell herauszieht. Es bleiben dann halbe Wirbelringe in der Flüssigkeit zurück, deren Axe in der freien Oberfläche liegt. Die freie Oberfläche bildet also eine durch die Axe gelegte Begrenzungsebene der Wassermasse, wodurch an den Bewegungen nichts wesentliches geändert wird.“ (HELMHOLTZ 1858, 37)

Die Struktur der Wirbelringe ist noch besser zu sehen, wenn die Löffelspitze zuvor mit Tinte benetzt wird.

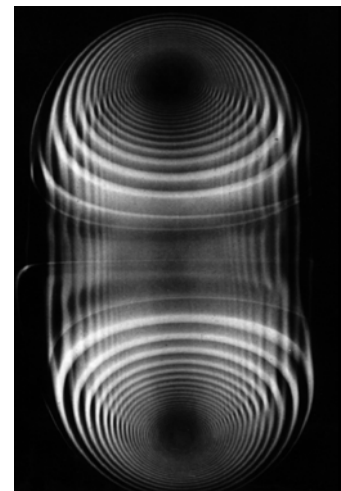


Abb 1.19: Wirbelring, zur Hälfte eingefärbt (VAN DYKE 1982, 44)

## Vergleich der Zirkulation eines Badewannenwirbels mit der eines Hurrikans

### a. Zirkulation des Wasserwirbels oder eines Wirbels im Waschbecken

Abstand vom Wirbelzentrum:  $r \approx 10 \text{ cm}$

Zeit für einen Umlauf:  $T \approx 5 \text{ s} \Rightarrow v = \frac{2\pi r}{T}$

$$\Gamma = v(r)2\pi r = 2\pi r \frac{2\pi r}{T} = \frac{(2\pi r)^2}{T} \approx 8 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

### b. Zirkulation eines Wirbelsturms

$v = 220 \text{ km/h} \approx 60 \text{ m/s}$  bei  $r \approx 70 \text{ km}$ , d.h. am Rande des Auges

$\Gamma = v(r)2\pi r = 2\pi \cdot 7 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot 60 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 2,6 \cdot 10^7 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ . Die Stärke des Sturms beträgt also das ungefähr  $10^9$ -fache der Stärke des Badewannenwirbels.