

METEOROLOGIE

# Wirbelstürme im Visier

Die Physik der Hurrikane, Taifune, Tornados und Windhosen

Dieter Etling

**Katrina, Rita, Andrew:** Diese Namen tropischer Wirbelstürme sind uns aus den Nachrichten vertraut. Doch woher beziehen diese Sturmsysteme die Energie für ihre Zerstörungskraft und was unterscheidet Hurrikane von Tornados? Obwohl die genauen Ursachen noch nicht vollständig verstanden sind, sollen hier die wichtigsten Charakteristika und die Physik dieser gewaltigen Wetterphänomene beleuchtet werden.

Im August 2005 hielten die Bürger mehrere südlicher US-Bundesstaaten den Atem an: Hurrikan Katrina hatte über den Gewässern des Golf von Mexiko Fahrt aufgenommen und begab sich nun auf Landkurs. Florida wurde durch einen überraschenden Kurswechsel Katrinas nur touchiert und kam vergleichsweise glimpflich davon. Dann traf es jedoch mit voller Wucht New Orleans. Tagelang gingen die Bilder der Zerstörung der Metropole in Louisiana um den Globus. Wirbelstürme solcher Energie sind zwar in Mitteleuropa bislang nicht aufgetreten, doch im März 2006 verursachte auch in der Hamburger Region ein Tornado zwei Todesopfer und hohe Sachschäden. Diese beiden Wetterereignisse sind exemplarisch für das Auftreten von Wirbelstürmen. Wie der Name bereits andeutet, handelt es sich um atmosphärische Wirbel – und zwar mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten.

## Hurrikane und Taifune

Um die Stärke der Wirbelstürme zu verdeutlichen, sei zunächst die Bedeutung des Begriffs „Sturm“ kurz erläutert: Windgeschwindigkeiten werden zwar in physikalischen Einheiten (m/s) gemessen, jedoch für praktische Zwecke meist der Beaufort-Skala (Bft) zugeordnet. Diese, nach dem britischen Admiral Francis Beaufort benannte Skala bewertet die Windstärke nach der Wirkung auf den Seegang bzw. auf Objekte an Land. Ein Sturm entspricht Windstärke Bft 9, d. h. die Windgeschwindigkeit liegt zwischen 75 und 88 km/h. Stürme verursachen an Land z. B. kleinere Schäden an Häusern, auf See hohe Wellenberge und dichte Schaumstreifen in Windrichtung. Die im Folgenden beschriebenen Wirbelstürme sind jedoch weit stärker als Bft 9.

Der eingangs erwähnte Hurrikan Katrina zählt zur Gruppe der tropischen Wirbelstürme [1, 2]. Diese

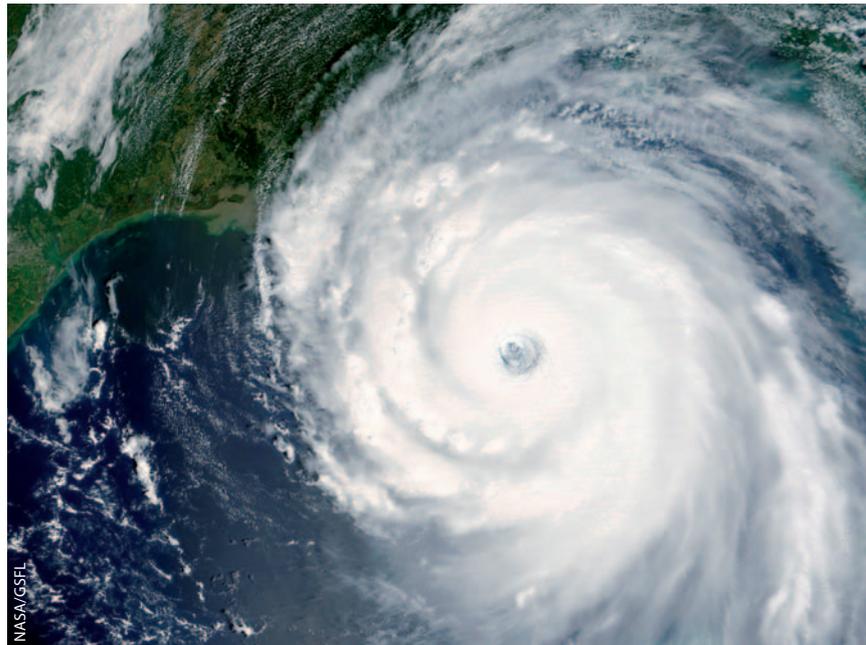


Abb. 1 Hurrikan Katrina am 28. August 2005 im Golf von Mexiko. Kurz danach waren über 1800 Todesopfer und 81 Milliarden Dollar Sachschäden zu beklagen. Um das Auge im Zentrum gruppieren sich die spiralförmigen Wolkenbänder.

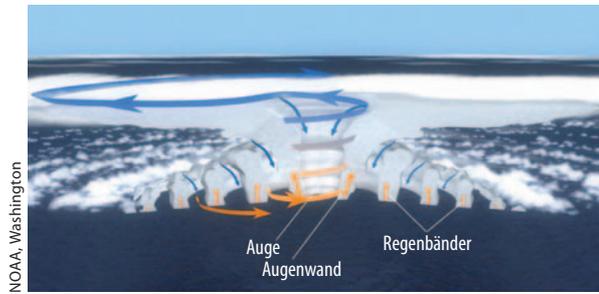
treten in den Tropen und Subtropen auf und werden im Nordatlantik Hurrikan genannt. Das Wort stammt aus einer Sprache der mittelamerikanischen Ureinwohner, dort ist Huracan der Gott des Windes und der Zerstörung. Wirbelstürme im Nordpazifik heißen Taifun, hier stand das chinesische „ta-feng“ (großer Wind) Pate bei der Namensgebung.

Im Prinzip handelt es sich bei den tropischen Wirbelstürmen um großräumige Tiefdruckgebiete, ähnlich den in unseren Breiten geläufigen Tiefs. In Satellitenbildern (Abb. 1) zeigen sie sich als fast kreisförmige Wol-

### KOMPAKT

- Die stärksten tropischen Wirbelstürme erreichen Windgeschwindigkeiten von über 250 km/h. Dazu kommen meterhohe Flutwellen und extreme Niederschläge.
- Die kleinräumigeren Tornados werden hauptsächlich im mittleren Westen der USA beobachtet, ihre Spitzenwindgeschwindigkeiten betragen bis zu 510 km/h.
- Beide Sturmarten werden von der latenten Wärme des Wasserdampfs angetrieben. Bei der Kondensation zu Wassertröpfchen wird sie in kinetische Energie, also Wind, umgewandelt. Der Dampf wird entweder über See (Hurrikan) oder Land (Tornado) aufgenommen.

Prof. Dr. Dieter Etling, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, Herrenhäuserstr. 2, 30419 Hannover



**Abb. 2** Bei einem tropischen Wirbelsturm gruppieren sich die Wolkenstrukturen (helle Flächen) um das zentrale Sturmauge. Die Strömungsverhältnisse, insbesondere auf- und absteigende Luftmassen, sind durch orange und blaue Pfeile symbolisiert.

1) Über die aktuelle Wirbelsturmssituation informieren mehrere Webseiten, von denen eine Auswahl unter <http://multimedia.physik-journal.de> zu finden ist.

kenanordnungen mit gelegentlich erkennbaren Spiralarmlen sowie dem wolkenfreien Zentrum – dem Auge. Bei einer typischen Ausdehnung eines tropischen Wirbelsturms von einigen 100 km weist das zentrale Auge nur einen Durchmesser von etwa 50 km auf (vgl. Tab.).

Die innere Struktur tropischer Wirbelstürme ist allerdings erheblich komplexer als dies auf einem Satellitenbild den Anschein hat. Sie bestehen aus Bändern von hochreichenden Kumuluswolken, also Schauer- und Gewitterwolken, in denen zum Teil kräftige Aufwinde herrschen (Abb. 2). In den Gebieten zwischen den Wolkenbändern sinkt die Luft ab, ebenso im Auge des Wirbelsturms. Die bänderförmige Struktur der Wolkenanordnung ist auch in Radarbildern sichtbar, auf die später noch eingegangen wird. Erst in den letzten Jahren ist es gelungen, die komplexen Vorgänge, die zur Bildung des Auges und der Augenwand sowie der Spiralbänder führen, näher aufzuklären [2, 3]. So vermutet man heute, dass z. B. die Spiralbänder durch sog. Rossby-Wellen ausgelöst werden. Diese nach dem schwedischen Meteorologen C. G. Rossby benannten Wellen haben eine horizontale Schwingungsebene und bilden sich am Rand des Auges durch die Variation der Windgeschwindigkeit aus (siehe auch Abb. 7).

Die tropischen Tiefdruckgebiete werden erst dann als „Wirbelsturm“ bezeichnet, wenn ihre Windgeschwindigkeit 64 km/h (entspricht Bft 8) überschreitet. Ab diesem Schwellenwert erhalten sie Namen, um sie bei ihrer weiteren Entwicklung leichter identifizieren zu können. Ab einer Windstärke von 117 km/h, d. h.

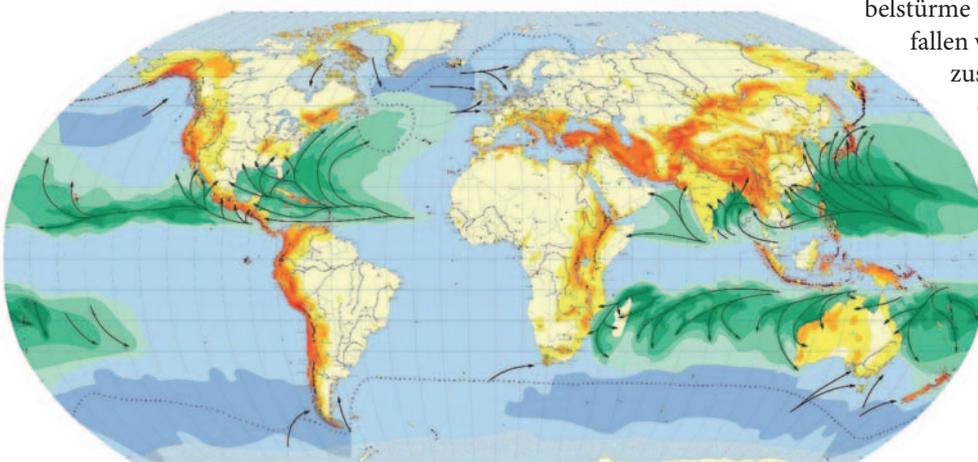
Typische Daten für Hurrikane und Tornados		
	Hurrikan	Tornado
Durchmesser	200 – 800 km	50 – 1000 m
Lebensdauer	4 – 14 Tage	3 – 30 Minuten
Windgeschwindigkeit	100 – 300 km/h	100 – 500 km/h
Druckabfall	50 – 100 hPa/ 100 km	50 – 100 hPa/ 100 m

einem Orkan mit Bft 12, spricht man schließlich von Hurrikane bzw. Taifunen. Für die in einem Hurrikan auftretenden Windgeschwindigkeiten gibt es über die Beaufort-Skala hinaus eigens die Saffir-Simpson-Skala. Diese umfasst die Kategorien 1 bis 5, wobei in einem „schwachen Hurrikan“ (Kategorie 1) Windgeschwindigkeiten von 117 bis 153 km/h auftreten. Katrina zählte dagegen zu den stärksten Exemplaren der Kategorie 5, mit Geschwindigkeiten von mehr als 250 km/h.

Neben diesen hohen Windgeschwindigkeiten verursachen Hurrikane und Taifune Flutwellen, die bei der Kategorie 5 über fünf Meter hoch sein können. Hinzu kommen erhebliche Regenmengen von durchschnittlich 400 Liter/m<sup>2</sup> in 24 Stunden (zum Vergleich: Die durchschnittliche Niederschlagsmenge in Deutschland beträgt 770 Liter/m<sup>2</sup> im Jahr). Tatsächlich hat die Kombination von hohen Windgeschwindigkeiten, hoher Flutwelle und großen Regenmengen die Katastrophe von New Orleans verursacht.

Zum Glück sind tropische Wirbelstürme relativ selten. So treten z. B. im Nordatlantik im Mittel zehn pro Jahr auf, darunter sechs Hurrikane. Nach dem Rekordjahr 2005 mit 28 tropischen Wirbelstürmen, darunter 15 Hurrikane, entzündete sich eine wissenschaftliche Kontroverse an der Frage, ob dafür die zurzeit beobachtete Erderwärmung verantwortlich ist, sei diese nun natürlich oder anthropogen verursacht. Die Beobachtungen legen einerseits nahe, dass in den letzten 30 Jahren zwar die Zahl der tropischen Wirbelstürme nicht zugenommen hat, jedoch deren Stärke [4, 5]. Besonders Wirbelstürme der Kategorien 4 und 5 traten in diesem Zeitraum vermehrt auf. Kritiker dieser Analysen verweisen jedoch auf Unsicherheiten in den Daten sowie der Auswertemethodik und bezweifeln eine Übertragbarkeit auf die zukünftige Klimaentwicklung [6, 7].

Weltweit werden pro Jahr etwa 80 tropische Wirbelstürme beobachtet. Ihre typischen Zugbahnen fallen weitgehend mit den warmen Ozeanen zusammen, da sich Wirbelstürme nur bei einer Wassertemperatur von mindestens 26° C ausbilden können [1, 2] (Abb. 3). Deshalb treten tropische Wirbelstürme auch nur in den warmen Monaten des Jahres auf. So erstreckt sich etwa die Hurrikansaison im Nordatlantik von April bis November.<sup>1)</sup>



Münchener Rückversicherung

**Abb. 3** In den grünen Regionen entwickeln sich tropische Wirbelstürme, schwarze Pfeile markieren ihre Zugbahnen.



Abb. 4 Als trichterförmige Wolke mit Bodenkontakt zeigt sich dieser Tornado der Stärke F4, der 1995 im texanischen Dimmit fotografiert wurde. Ein heftiger Druckabfall führt zur Kondensation des Wasserdampfes zu Tröpfchen und lässt den Schlauch sichtbar werden.

### Tornado und Windhose

Die höchste bislang gemessene Windgeschwindigkeit von 510 km/h wurde nicht bei einem Hurrikan, sondern bei einem Tornado in der Nähe von Oklahoma City beobachtet [8]. Ein Tornado ist ein schlauchförmiger oder trichterförmiger Wirbel unterhalb einer großen Schauer- oder Gewitterwolke (Abb. 4) [9, 10]. Dieser sichtbare Teil des Tornados kommt durch den plötzlichen Druckabfall, der bis zu 100 hPa auf 100 m Distanz betragen kann, und die damit verbundene Kondensation von Wasserdampf im Bereich des Wirbelkerns zustande. Der Durchmesser beträgt lediglich einige hundert Meter und die Lebensdauer einige Minuten (Tabelle). Anders als Hurrikane sind Tornados also kleinräumige, kurzlebige atmosphärische Phänomene.

Der Name „Tornado“ stammt von dem spanischen Wort für drehen (tornare). In Deutschland ist daneben auch die Bezeichnung „Windhose“ oder, beim Auftreten über Gewässern, „Wasserhose“ geläufig. Namensgebend hierzulande war der einem Hosenbein ähnelnde, schlauchförmige Wirbel. In Südeuropa wird überwiegend die Bezeichnung Trombe (von Tromba, italienisch für Trichter) verwendet. Der eigentliche Tornado ist nur ein kleiner Teil der komplexen Zirkulation in einer großen Schauer- oder Gewitterwolke, deren horizontale und vertikale Ausmaße etwa 10 km betragen (Abb. 5).

Auch für Tornados existiert eine eigene Windstärken-Skala, die Fujita-Skala. Sie umfasst die Klassen F1 bis F5. Ein Tornado der Kategorie F3 tobt z. B. mit Windgeschwindigkeiten von 180 bis 250 km/h, ein Hurrikan muss dafür schon Kategorie 4 haben. Für die von Tornados angerichtete Zerstörung (siehe auch Abb. 12) spielt vor allem die hohe Windgeschwindigkeit, zum Teil in Verbindung mit dem raschen Druckabfall, die Hauptrolle. Der Niederschlag aus der Mutterwolke ist von geringerer Bedeutung.

Tornados treten hauptsächlich in den USA, besonders im mittleren Westen auf, wo sie etwa 1000-mal pro Jahr beobachtet werden. Dies liegt an der großen

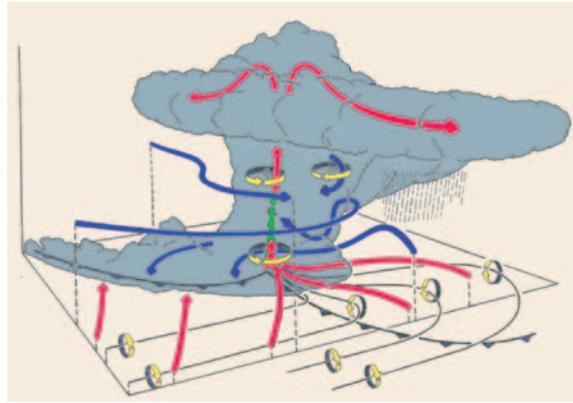


Abb. 5 In einer großen Schauerwolke treten warme (rote Pfeile) und kalte (blaue Pfeile) Luftströmungen auf. Gelbe Ringe symbolisieren den lokalen Rotationssinn des Windfeldes. Im Zentrum ist grün ein rotierender Aufwind zu erkennen: der entstehende Tornado.

Häufigkeit von Schauern und Gewittern, begünstigt durch das Aufeinandertreffen von feucht-warmer Luft aus dem Golf von Mexiko und kalt-trockener Luft aus Kanada. Die dadurch entstehende „Tornado-Allee“ ist im gleichnamigen Buch eindrucksvoll beschrieben [10]. In Deutschland werden pro Jahr etwa 20, meist schwache, Tornados beobachtet.<sup>2)</sup>

### Die Jagd auf Wirbelstürme

Angesichts der beschriebenen Windstärken und der oft damit verbundenen Schäden ist es nicht verwunderlich, dass sich meteorologische Parameter wie Druck, Temperatur und Windgeschwindigkeit mit ortsfesten Instrumenten wie Barometer, Thermometer, Anemometer kaum in einem Wirbelsturm messen lassen. Wenn auch vereinzelt solche Messungen von Instrumenten vorliegen, die nicht von der Sturmgewalt zerstört wurden, so haben in den letzten Dekaden vermehrt Fernerkundungsmethoden den Kenntnisstand über Hurrikane und Tornados stark verbessert.

Für die Tornadoforschung erwiesen sich besonders mobile Doppler-Radargeräte (Abb. 6) [11] als sehr hilf-



2) Die volle Dynamik von Tornados erschließt sich nur in Video-Aufnahmen. Links dazu sind ebenfalls im Multimedia-Kanal des Physik Journals zu finden.

Abb. 6 Tornados lassen sich mittels mobilem Doppler-Radar beobachten. Die Radarantenne ist auf der Rückseite des Fahrzeugs zu erkennen.

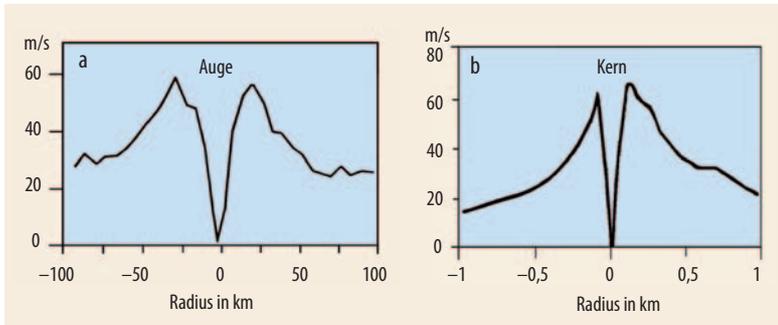


Abb. 7 Verlauf der Windgeschwindigkeit entlang eines Wirbeldurchmessers beim Hurrikan Andrew von 1992 (a) und beim

Tornado in Dimmit von 1995 (b). Man beachte die unterschiedlichen Längenskalen.

reich, da der Tornado-Schlauch nur wenige hundert Meter Durchmesser hat und schnell mit der Mutterwolke weiterzieht. Mit solchen, auch als „Doppler on Wheels (DOW)“ bezeichneten Messgeräten wurde auch die bereits erwähnte, bisher höchste Windgeschwindigkeit gemessen [8]. Als Beispiel einer Radarmessung zeigt Abb. 7b das radiale Windprofil des Tornados aus Abb. 4.

Trotz solcher moderner Messtechnik ist die Beobachtung der Tornadostruktur keineswegs einfach, da nach wie vor nicht genau bekannt ist, wann, wo und aus welcher Wolke ein Tornado entsteht. Zur wissenschaftlichen „Tornadojagd“ gehört also neben gründlichen Kenntnissen der physikalischen Mechanismen ihrer Entstehung auch etwas Glück.

Hier haben es die Hurrikanforscher etwas einfacher. Durch ihre große horizontale Ausdehnung von einigen hundert Kilometern sind tropische Wirbelstürme schon frühzeitig mit Wettersatelliten zu entdecken. Bevor diese Stürme in Landnähe kommen und somit ebenfalls Regenradar und Windradar zugänglich sind (Abb. 8), fliegen speziell ausgerüstete Flugzeuge des US-

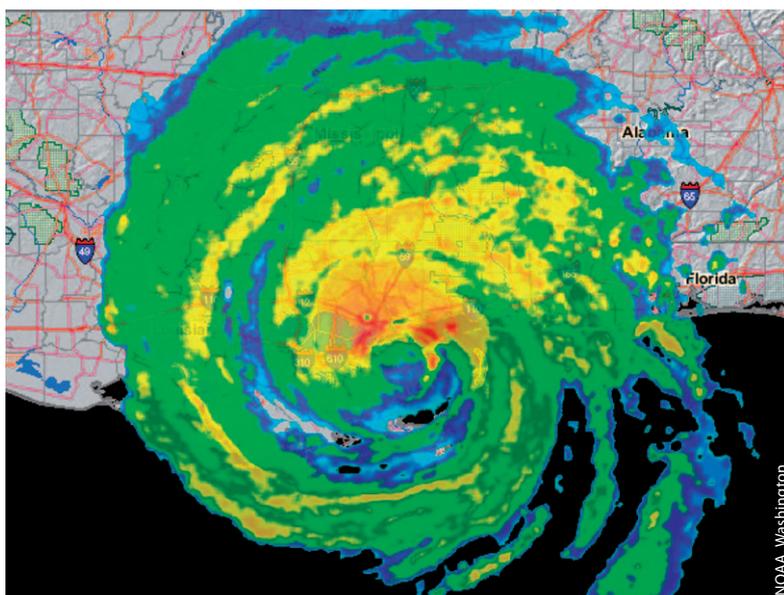


Abb. 8 Radarbild des Hurrikan Katrina (2005) mit Zentrum über New Orleans. Die Farbstufen stehen für die Stärke der Radarreflektivität, die ein Maß für die Regenintensität ist. Die Skala geht von rot

(stark) über gelb, blau, grün zu grau (schwach). Man erkennt starke Niederschläge im Bereich der Augenwand sowie der spiralförmigen Regenbänder.

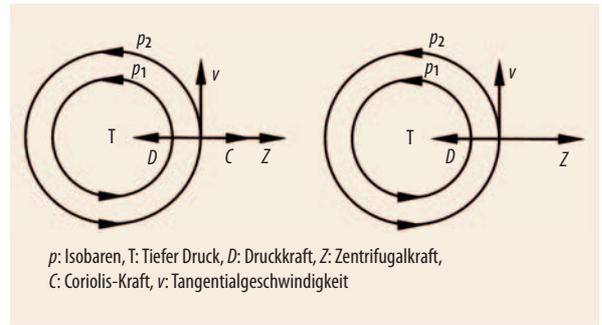


Abb. 9 Die idealisierte kreisförmige Wirbelstruktur von Hurrikan (links) und Tornado (rechts) lässt sich durch ein Kräftegleichgewicht beschreiben.

Wetterdienstes NOAA durch die Hurrikane, um Wind, Temperatur und Druck zu messen [1]. Angesichts der großen Vertikalgeschwindigkeiten, besonders im Bereich des Augenwands, sind dies keine Spazierflüge, sondern harte Arbeit im Dienst der Wissenschaft. Die so gewonnenen Daten gehen sofort in Simulationsrechnungen ein (siehe Abschnitt „Wirbelverstärkung“), um die weitere Entwicklung des Hurrikans vorherzusagen [12, 13]. Insbesondere Ort und Zeitpunkt des ersten Landkontakts sind für den Katastrophenschutz von Interesse. Physikalische Messungen (Abb. 7) und numerische Simulationen zusammen mit der Interpretation der Resultate durch Meteorologen können hierbei Menschenleben retten.

### Kräfte im Gleichgewicht

Auch wenn die Strömungen innerhalb von Hurrikanen oder Tornados eine sehr komplexe dreidimensionale Struktur aufweisen, so lässt sich die annähernd kreisförmige Zirkulation des Wirbelkerns vereinfacht durch das Gleichgewicht zwischen Druck-, Zentrifugal- und Coriolis-Kraft beschreiben (Abb. 9). Für den Tornado (oder einen ähnlichen kleinräumigen Wirbel) kann die Coriolis-Kraft vernachlässigt werden. Im reibungsfreien Fall würden sich Zentrifugalbeschleunigung  $Z$  und Druckkraft  $D$  das Gleichgewicht halten und der Wind würde kreisförmig um das Wirbelzentrum wehen. Die in der Realität immer vorhandene Reibungskraft lenkt den Wind zum Wirbelzentrum hin ab, sodass eine Strömung zum Zentrum hin auftritt (Strömungskonvergenz), die wiederum zu einer aufsteigenden Luftbewegung im Wirbelkern führt.

Bei einem Hurrikan oder einem anderen tropischen Wirbelsturm kommt die Corioliskraft hinzu, ansonsten sind die Kräfte- und Strömungsverhältnisse ähnlich wie in einem Tornado. In beiden Fällen treten die hohen Windgeschwindigkeiten in einem kleinen Kernbereich des Wirbels auf (Abb. 7).

### Wie entstehen die hohen Geschwindigkeiten?

So unterschiedlich Hurrikan und Tornado auch sind, sie haben eines gemeinsam: Beide sind seltene Ereignisse von konzentrierten Wirbeln mit hoher Kernwindgeschwindigkeit. Die Hauptfrage ist daher: Wie

kommt es zur Ausbildung dieser Wirbelkonzentration? Nachdem bereits verschiedene meteorologische Vorbedingungen genannt wurden, unter denen Hurrikane oder Tornados auftreten, ist die formale Beschreibung mittels physikalischer Gesetzmäßigkeiten der nächste Schritt. Atmosphärische Phänomene gehorchen den klassischen Gleichungen der Strömungsmechanik: Der Wind wird durch die Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben, wobei allerdings die Atmosphäre als turbulente Strömung behandelt werden muss. Die Kontinuitätsgleichung verknüpft das Dichte- mit dem Geschwindigkeitsfeld. Luftdruck und Temperatur werden schließlich über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben. Dabei müssen zusätzlich Phasenübergänge zwischen Wasserdampf, Flüssigwasser und Eis berücksichtigt werden, da ja Hurrikane und Tornados als Energiequelle hochreichende Schauer- und Gewitterwolken benötigen.

Die Kombination der oben genannten Gesetzmäßigkeiten führt jedoch nicht einfach zu einer klaren Ursache für die Ausbildung von Wirbeln. Daher müssen Einzelursachen isoliert werden. Hier sei als Beispiel auf den Hauptmechanismus der Wirbelverstärkung eingegangen. Dazu verwendet man nicht die oben genannten Gleichungen, sondern eine abgeleitete Beziehung aus den Navier-Stokes-Gleichungen, die so genannte Wirbelgleichung oder auch Vorticity-Gleichung. Als Maß für die Wirbelstärke wird dabei die Rotation des Geschwindigkeitsfeldes  $\nabla \times v$  gewählt.

Da sich Hurrikane und Tornados hauptsächlich um die vertikale Achse drehen, wird im Weiteren die mit  $\omega$  bezeichnete Vertikalkomponente der Geschwindigkeitsrotation (Vorticity) betrachtet. Für ihre zeitliche Änderung  $d\omega/dt$  gilt näherungsweise die Gleichung:

$$\frac{d\omega}{dt} = -(f + \omega) \nabla_h \cdot v_h \quad (1)$$

Hierbei ist  $f = 2\Omega \sin\varphi$  der sog. Coriolis-Parameter, der sozusagen die Hintergrundrotation der Atmosphäre vom Inertialsystem aus betrachtet darstellt.  $\Omega$  bezeichnet die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation und  $\varphi$  die geographische Breite. Der Term  $\nabla_h \cdot v_h$  ist die horizontale Divergenz der Windgeschwindigkeit.

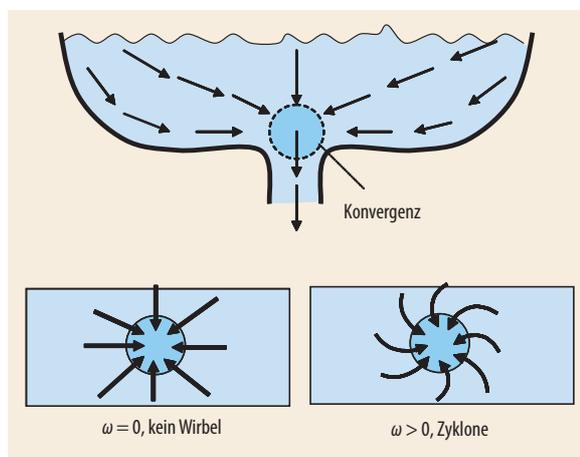


Abb. 10 Beim Abfluss aus einem Behälter bildet sich ein Wirbel nur dann aus, wenn bereits zu Beginn ein Drehsinn vorgegeben ist ( $\omega \neq 0$ ). Oben: Querschnitt, unten: Aufsicht.

### Wirbelverstärkung bei Tornado ...

Betrachten wir zunächst ein Wirbelphänomen, bei dem wie beim Tornado die Erdrotation und damit die Coriolis-Kraft keine Rolle spielen. Die Wirbelgleichung (1) besagt, dass die Vorticity anwächst ( $d\omega/dt > 0$ ), wenn neben  $\nabla_h \cdot v_h < 0$  bereits  $\omega \neq 0$  gilt.

Nehmen wir als alltägliches Beispiel die Strömung am Ablauf eines Waschbeckens oder einer Badewanne. Wenn der Stöpsel bei gefülltem Becken gezogen wird, strömt das Wasser Richtung Abflussloch, sodass in diesem Bereich eine Strömungskonvergenz vorliegt (Abb. 10). Ob es zu dem häufig beobachteten Abflusswirbel kommt, hängt nun davon ab, ob beim Ziehen des Stöpsels auch ein anfänglicher Drehsinn (Vorticity  $\omega$ ) verursacht wurde. Ist dieser zufällig im Uhrzeigersinn (antizyklonal,  $\omega < 0$ ), so wird sich nach kurzer Zeit ein starker Wirbel mit gleichem Drehsinn oberhalb des Ablaufs ausbilden (im Falle einer zyklonalen Anfangsstörung,  $\omega > 0$ , dreht der Wirbel andersherum). Unter idealen Versuchsbedingungen könnte der Stöpsel störungsfrei, d. h. ohne Anfangsdrehsinn, entfernt werden. Dann würde sich am Ablauf auch kein Wirbel bilden (Abb. 10). Dieser Mechanismus der Wirbelverstärkung erinnert an die Drehimpulserhaltung und Pirouetten beim Eiskunstlauf.

Unter der Annahme einer (zumindest anfänglich) konstanten Strömungskonvergenz,  $\nabla_h \cdot v_h = -D$ , ergibt sich als Lösung der Wirbelgleichung (1):

$$\omega(t) = \omega(0) e^{Dt} \quad (2)$$

Die Vorticity wächst somit schnell an und ist umso größer, je größer die Anfangsstörung  $\omega(0)$  ist. Letzteres lässt sich leicht ausprobieren, indem man vor dem Ziehen des Stöpsels das Wasser im Becken bzw. der Wanne mit der Hand in Kreisbewegung versetzt.

Zur Demonstration der Wirbelbildung in einer Vorlesung oder im Schulunterricht verwendet man am besten einen Plexiglaszylinder von 20 bis 30 cm Durchmesser. In das Zentrum des Zylinderbodens wird ein Abflussloch von 10 bis 20 mm Durchmesser gebohrt. Die anfängliche Wasserhöhe sollte zwischen 10 und 20 cm betragen. Wenn man das eingefüllte Wasser

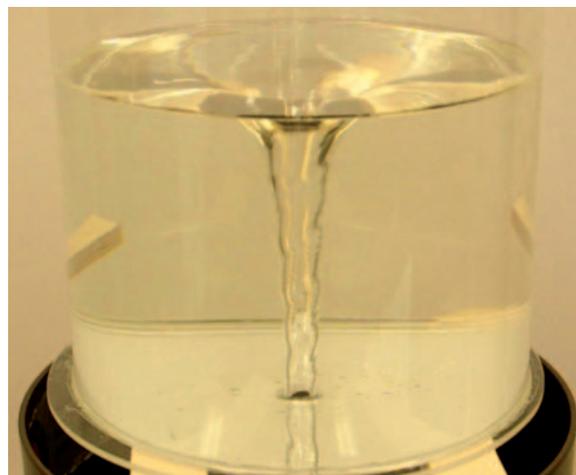


Abb. 11 In einem zylindrischen Wassergefäß bildet sich über dem Ablauf im Zentrum ein schlauchförmiger Hohlwirbel aus.



Abb. 12 Im thüringischen Quirl richtete ein Tornado am 2. Oktober 2006 erhebliche Schäden an.

zunächst eine Weile ruhen lässt, entsteht erst nach längerer Zeit, wenn überhaupt, ein sichtbarer Wirbel. Ein leichtes Umrühren der Wassersäule vor dem Ziehen des Stöpsels führt jedoch innerhalb weniger Sekunden zu einem schlauchförmigen Hohlwirbel oberhalb des Abflussloches (Abb. 11).

Der eben diskutierte Mechanismus der Wirbelverstärkung ist auch ein Bestandteil der komplexen Vorgänge bei der Tornado-Entstehung. Die horizontale Windkonvergenz wird unterhalb der Mutterwolke durch die starken Aufwinde, die in einer Kumuluswolke herrschen, erzeugt. Woher die anfängliche Rotation  $\omega$  jedoch kommt, ist nach wie vor unklar und Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten [9, 14]. Eine Möglichkeit ist die, dass die Mutterwolke, aus der schließlich ein Tornado entsteht, sich ihrerseits um ihre vertikale Achse dreht, wobei diese Drehung durch die Wechselwirkung von Windscherungen im Bereich der Umgebungsluft eingeleitet wird. Diese Art von rotierenden Gewitterwolken, welche wegen ihres Durchmessers von 30 bis 50 km auch als Superzellen bezeichnet werden, treten hauptsächlich in den USA auf.

Alles in allem entspringt ein Tornado aus einem recht komplexen Wechselspiel zwischen den Auf- und Abwinden in der Wolke und den Windverhältnissen der Wolkenumgebung (siehe Abb. 5), das bis heute noch nicht restlos geklärt ist. Jedenfalls müssen ganz spezielle Verhältnisse bei der Tornado-Entstehung herrschen, sonst wären diese nicht so selten.

### ... und Hurrikan

Betrachten wir jetzt noch den Fall, in dem die Erdrotation bei der Wirbelbildung eine Rolle spielt. Das sind großräumige (Ausdehnung von einigen hundert Kilometern) und langlebige (Dauer von Stunden und Tagen) Wettervorgänge wie z. B. Hurrikane und Taifune.

Nun kann ein Wirbel wegen der immer vorhandenen Erdrotation  $f$  sogar aus einer wirbelfreien Strömung ( $\omega(0) = 0$ ) entstehen. In diesem Fall ist anfänglich  $d\omega/dt \approx fD$ , sodass sich bei einer Windkonvergenz ein Wirbel mit dem gleichen Drehsinn wie  $f$ , also im Gegenuhrzeigersinn, bildet. Tatsächlich beobachtet

man bei allen tropischen Wirbelstürmen eine entsprechende Drehung des Windes um das zentrale Auge.

Der oben beschriebene Effekt der Erdrotation auf die Wirbelbildung lässt sich sehr einfach mit der vorher beschriebenen „Versuchsbadewanne“ durchführen, indem diese auf einem Drehtisch montiert wird. Nach dem Ziehen des Stöpsels bildet sich nach kurzer Zeit ein Wirbel mit der gleichen Drehrichtung des Drehtisches. Übrigens wurde dieser Modellversuch erst kürzlich anhand von Experimenten und theoretischen Überlegungen ausführlich diskutiert [15].

Die Entstehung eines tropischen Wirbelsturms ist natürlich sehr viel komplexer als in einem solchen einfachen Laborversuch. Zwar hat man festgestellt, dass der Einfluss der Erdrotation eine der notwendigen Bedingungen für dessen Ausbildung ist (am Äquator wäre  $f = 0$ ), jedoch kann eine zufällige Ansammlung hochreichender Kumuluswolken, z. B. in sog. Wolkenhaufen, wie sie häufig in den Tropen auftreten, allein keinen Wirbelsturm erzeugen. Die gemäß Gl. (1) notwendige horizontale Windkonvergenz tritt zwar unter jeder dieser Wolken auf, wie auch bei Wolken, aus denen Tornados entstehen, jedoch sind die Konvergenzgebiete zu kleinräumig, als dass die Coriolis-Kraft einen Einfluss hätte. Beobachtungen und numerische Simulationen haben ergeben, dass bereits eine großräumigere Störung in Form eines zyklonalen Wirbels vorhanden sein muss, damit sich aus tropischen Wolkenhaufen ein Wirbelsturm bildet. Wodurch diese Anfangszyklone ausgelöst werden, ist noch weitgehend unklar.

Als eine Möglichkeit kommen Störungen in Betracht, die durch eine großräumige tropische Wellenerscheinung, den „Easterly Waves“ verursacht werden. Diese Wellen mit horizontaler Schwingungsebene und etwa 1000 km Wellenlänge entstehen durch Instabilitäten im sog. Subtropen-Strahlstrom, einem in Ost-West-Richtung verlaufenden Starkwindband im Bereich der Passatwinde. In den Trögen dieser Wellen, also den Ausbuchtungen der Isobaren nach Norden, erfährt die Luftströmung eine Krümmung im Gegenurszeigersinn, was gleichbedeutend mit einer zyklonalen Vorticity ist. Wenngleich auch einige Hurrikane ihren Ursprung in diesen Wellenerscheinungen haben, so ist die eigentliche Genese tropischer Wirbelstürme noch nicht vollständig aufgeklärt.<sup>3)</sup>

### Wasserdampf als Treibstoff

Die hohen Windgeschwindigkeiten und die damit verbundenen großen Schäden durch Wirbelstürme werfen die Frage auf, woher diese Wirbel ihre beachtliche kinetische Energie nehmen.

So verschieden Hurrikane und Tornados auch sind, eines haben sie gemeinsam: Beide benötigen zu ihrer Bildung und Existenz hochreichende Kumuluswolken. Während ein Tornado jedoch aus einer einzelnen Wolkenzelle entsteht, besteht ein Hurrikan aus einer Vielzahl solcher Wolken. Diese Wolken sind sozusagen der

3) In einem neueren Übersichtsartikel [2] über tropische Wirbelstürme findet sich hierzu der Satz: „Clearly, we have a long way to go in understanding genesis (of tropical cyclones)“.

Antrieb der Wirbelsysteme. Grob gesprochen geht es dabei um die Umsetzung von innerer und potenzieller Energie in kinetische Energie, die sich als Wind äußert.

Dies sei am Beispiel der Vertikalbewegung in einer Wolke vereinfacht dargestellt. Aus den Mechanikvorlesungen zur Experimentalphysik ist der Begriff des Archimedischen Auftriebs bekannt, der sich für die Vertikalbeschleunigung  $dw/dt$  eines Luftpartikels vereinfacht schreiben lässt als:

$$\frac{dw}{dt} \approx -g \frac{\rho_p - \rho_u}{\rho_p} \approx g \frac{T_p - T_u}{T_p} \quad (3)$$

Dabei sind  $w$  die Vertikalgeschwindigkeit (Aufwind, Abwind),  $g$  die Erdbeschleunigung,  $\rho$  die Luftdichte und  $T$  die Lufttemperatur in Kelvin. Der Index  $p$  bezeichnet das Luftpaket, der Index  $u$  die Umgebungseigenschaften. Gleichung (3) drückt die bekannte Erfahrungstatsache aus, dass leichte (wärmere) Luft aufsteigt und schwerere (kältere) Luft absinkt. Nun ist die Umgebungstemperatur in der Atmosphäre immer eine Funktion der Höhe  $T_u(z)$ , aber auch das Luftpaket ändert seine Temperatur  $T_p$  während des Aufstiegs (z. B. durch adiabatische Abkühlung). Wie stark ein Luftpaket vertikal beschleunigt wird und wie lange diese Beschleunigung anhält, hängt von der Temperaturdifferenz  $T_p - T_u$  in Gl. (3) ab. Hier kommt nun die Wolkenbildung ins Spiel. Eine Wolke wird quasi durch die Kondensation von Wasserdampf zu Flüssigwasser (Wolkentropfen) definiert. Aus der Thermodynamik wissen wir, dass beim Phasenübergang von Wasserdampf zu Wasser die latente Wärme freigesetzt wird. Dies führt zu einer Temperaturerhöhung  $dT$ , für die angenähert gilt:

$$c_p dT \approx L dq \quad (4)$$

Dabei ist  $c_p$  die spezifische Wärme bei konstantem Druck ( $c_p = 1007 \text{ J/kg}$ ),  $L$  die latente Wärme für die Wasserdampfkondensation ( $L = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ ) und  $dq$  die pro Masseneinheit umgewandelte Wasserdampfmenge.

In Bezug auf den Archimedischen Auftrieb (3) eines feuchten Luftpartikels, das beim Aufstieg kälter wird und in dem der vorhandene Wasserdampf dabei kondensieren kann, erkennt man aus Gl. (4), dass das Partikel bei der Kondensation erwärmt und somit nochmals beschleunigt wird. Daher können Kumuluswolken unter gegebenen Umständen bis an die Obergrenze der Troposphäre (10 bis 15 km Höhe) vorstoßen und dabei sehr hohe Vertikalgeschwindigkeiten erzeugen (zwischen 10 und 40 m/s). Flugzeugpiloten gehen deshalb Kumulonimbus-Wolken möglichst aus dem Weg.

Woher stammt nun der Wasserdampf für die Wolken? Aus der Verdunstung von Wasser über Land bei den Tornados bzw. an der Meeresoberfläche bei den tropischen Wirbelstürmen. Nach der Beziehung von Clausius-Clapeyron kann ein Luftvolumen proportional zur Temperatur eine Wasserdampfmenge aufnehmen. Daher eignen sich besonders tropische Meere für die Bildung von Kumulonimbus-Wolken. Tatsächlich fand man als eine der Hauptvoraussetzungen für die Bildung tropischer Wirbelstürme, dass die Tempera-

tur der Meeresoberfläche mindestens  $26^\circ \text{C}$  betragen muss [1, 2]. Der Treibstoff für Hurrikane und Tornados ist somit letztlich Wasserdampf, wobei die beim Kondensationsvorgang frei werdende latente Wärme in kinetische Energie umgesetzt wird. Die „Tankstelle“ befindet sich an der Erdoberfläche. Werden dort die Quellen schwächer oder versiegen, z. B. weil ein Hurrikan über kälteres Wasser oder über Land zieht, fehlt dem Motor die notwendige Kraft, um die Stürme aufrecht zu erhalten. Die Energieumwandlungen in Wirbelstürmen sind natürlich wesentlich komplexer als durch die einfachen Beziehungen (3) und (4) beschrieben. Ausführliche Diskussionen zu dieser Problematik findet man für Tornados in [9, 10, 14] und für Hurrikane bzw. Taifune in [1–3].

Die diesjährige Wetter-Statistik für die Saison 2006 weist für den Nordatlantik momentan neun tropische Wirbelstürme, darunter fünf Hurrikane auf (In Deutschland haben Tornados Zerstörungen hinterlassen, Abb. 12). Das ist weit entfernt von den Rekordzahlen des Vorjahres (28 und 15). War 2005 also eine Ausnahme? Oder sind wir Zeugen erster Anzeichen einer zunehmenden Wirbelsturmaktivität verursacht durch eine Klimaänderung? Die wissenschaftliche Debatte dazu wird auch in Zukunft anhalten.

#### Literatur

- [1] K. Emanuel, *Divine Wind, The History and Science of Hurricanes*, Oxford University Press, Oxford (2005)
- [2] K. Emanuel, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **31**, 75 (2003)
- [3] Y. Wang, C. C. Wu, *Meteorol. Atmos. Phys.* **87**, 257 (2004)
- [4] K. Emanuel, *Nature*, **436**, 686 (2005)
- [5] P. J. Webster et al., *Science* **309**, 1844 (2005)
- [6] C. W. Landsea, *Nature*, **438**, E 11 (2005)
- [7] R. A. Anthes et al., *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **87**, 623 (2006)
- [8] R. Monastersky, *Science News* **155**, 308 (1999)
- [9] C. Church, D. Burgess, C. Doswell und R. Davies-Jones (Hrsg.), *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*, Geophysical Monograph 79, American Geophysical Union, Washington (1993)
- [10] H. Bluestein, *Tornado Alley*, Oxford Univ. Press, Oxford (1999)
- [11] J. Wurman, S. Gill, *Mon. Wea. Rev.* **128**, 2135 (2000)
- [12] H. Kurihara, R. E. Tuleya und M. A. Bender, *Mon. Wea. Rev.* **126**, 1306 (1998)
- [13] B. W. Shen et al., *Geophys. Res. Lett.* **33**, L 13813 (2006)
- [14] R. Davies-Jones, R. J. Trapp und H. B. Bluestein, *Tornados and Tornadoic Storms*, in: C. A. Doswell (Hrsg.), *Severe Convective Storms*. Meteorol. Monogr. 25, Amer. Meteor. Soc., Boston (2001), S. 167
- [15] A. Andersen, T. Bohr, B. Stenum, J. Rassmussen und B. Laurrup, *J. Fluid Mech.* **556**, 121 (2006)

#### DER AUTOR

**Dieter Etling** ist seit 1979 Professor für Theoretische Meteorologie an der Universität Hannover. Er studierte Physik und Meteorologie in Frankfurt, Marburg und Darmstadt. Dort, an der TH Darmstadt, schloss er sein Studium 1971 ab und promovierte fünf Jahre später. Ab 1976 folgten zwei Jahre als Postdoc am IBM Research Center im kalifornischen San Jose. Seine Forschungsgebiete reichen von der atmosphärischen Grenzschicht über thermische Konvektionen bis zur Wirbelndynamik. Diesen Themen geht er mit numerischen Simulationen und Laborexperimenten auf den Grund.

