

## Verstärkt die globale Erwärmung Wirbelstürme?

**Die Häufung von tropischen Wirbelstürmen im Atlantik in den letzten Jahren steht mindestens teilweise in Zusammenhang mit der menschengemachten globalen Erwärmung. Zu dieser Aussage haben sich die wissenschaftlichen Hinweise in den letzten Monaten immer mehr verdichtet. Auch wenn verschiedene Faktoren die Entstehung von Wirbelstürmen beeinflussen, scheint die aktuelle Zunahme vor allem in Verbindung mit den steigenden Meeresoberflächentemperaturen zu stehen. Und diese Erwärmung ist mindestens teilweise auf die steigenden Treibhausgaskonzentrationen zurückzuführen.**

Die Hurrikan-Saison im Jahr 2005 hat viele Rekorde gesetzt. Sie begann im Juni und endete ungewöhnlich spät, nämlich erst im Januar 2006. Achtundzwanzig getaufte tropische Wirbelstürme wurden beobachtet, davon entwickelten sich fünfzehn zu einem Hurrikan und sieben zu einem grossen Hurrikan ('major hurricane') mit Windgeschwindigkeiten grösser als 178 km/h. Fünf dieser grossen Hurrikane trafen auf Land, unter anderem verursachten Rita und Katrina die bekannten grossen Schäden. Zum ersten Mal reichte die vorbereitete alphabetische Namensliste nicht für die Taufe der Stürme aus. Die sechs letzten Stürme der Saison wurden mit griechischen Buchstaben getauft, der letzte im Januar 2006 auf den Namen 'Zeta'. Zudem traf zum ersten Mal überhaupt ein tropischer Sturm, wenn auch in abgeschwächter Form, in Spanien auf europäisches Festland. Bereits die Saison im Jahr 2004 im Atlantik hatte mit fünfzehn getauften Stürmen, neun Hurrikanen und sechs grossen Hurrikanen weit über dem Durchschnitt gelegen und den ersten tropischen Wirbelsturm im Südatlantik gebracht. Worauf ist diese Entwicklung zurückzuführen? Ist die globale Erwärmung schuld? Vor allem aus dem amerikanischen Hurrikan-Prognose-Zentrum war zu vernehmen, es handle sich lediglich um ein natürliches Phänomen, hervorgerufen durch langfristige Schwankungen der Meeresoberflächentemperaturen im Atlantik. Andere Wissenschaftler betonten hingegen, dass sich in diesem Anstieg durchaus bereits ein Signal der menschenverursachten globalen Erwärmung abzeichnen könnte. In den letzten Monaten sind nun zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht worden, die praktisch ausnahmslos darauf hinweisen, dass bei diesem Anstieg unter anderem auch die Klima-

erwärmung eine Rolle gespielt hat. Die Argumente für eine rein natürliche Ursache werden immer schwächer. Was spricht nun für, was gegen einen menschlichen Einfluss?

### Wärme aus dem Meer speist Hurrikane

Die Entstehung von Wirbelstürmen ist an warme Ozeantemperaturen gebunden. Ein Wirbelsturm bezieht seine Energie zur Hauptsache aus der Kondensation von Wasserdampf, d.h. die bei der Bildung von Wolkentröpfchen freiwerdende Energie wird im Sturm in Bewegungsenergie umgewandelt. Über Landoberflächen verliert ein Wirbelsturm rasch an Kraft. Nur über warmen Meeresoberflächen kann die Luft genügend Wasserdampf aufnehmen, um den Sturm mit Energie zu versorgen. Denn grundsätzlich gilt, je wärmer das Meerwasser unter einem Sturm, umso stärker kann der Sturm werden. Aufgrund dieser physikalischen Kenntnisse ist davon auszugehen, dass bei einem generellen Anstieg der Meeresoberflächentemperaturen durch die globale Erwärmung die Wirbelstürme im Durchschnitt stärker werden.

Es gibt jedoch noch andere Faktoren, welche die Entstehung und Stärke eines Sturmes beeinflussen (siehe Kasten), insbesondere die höhenabhängige Veränderung von Temperatur und Windverhältnissen. Je stärker die Temperatur abnimmt, umso schneller steigt die Luft auf und umso mehr Wasser kondensiert, was den Sturm stärker macht. Aufgrund der physikalischen Modellrechnungen wird erwartet, dass sich wegen des grösseren Treibhauseffektes die Troposphäre eher etwas stärker erwärmt als die Erdoberfläche, was demnach eine Verringerung der möglichen Sturmstärke bedeuten würde. Dieser Effekt wird jedoch als geringer eingeschätzt als die Wirkung der höheren Ozeantemperaturen.

Die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf den dritten entscheidenden Faktor, die Windverhältnisse, sind unklar. Bisher zeichnen sich dazu keine klaren Veränderungen ab.

### Modelle sagen weniger, aber stärkere Stürme voraus

Die meisten Klimamodelle prognostizieren eine Zunahme der maximalen Windgeschwindigkeiten in Wirbelstürmen aufgrund der globalen Erwärmung. Bei der erwarteten Erwärmung im 21. Jahrhundert beträgt die Zunahme eini-

### **Tropische Wirbelstürme und ihre Entstehung**

Tropische Wirbelstürme sind Tiefdruckgebiete in den Tropen bzw. Subtropen, in welchen durch spezielle physikalische Prozesse und atmosphärische Bedingungen sehr hohe Windgeschwindigkeiten auftreten. Wirbelstürme gewinnen ihre Energie vor allem aus der Kondensation von Wasserdampf und sind deshalb an Gebiete mit hoher Verdunstung und hohem Wasserdampfgehalt gebunden, wie sie nur über tropischen Ozeanen zu finden sind. Die Entstehung von Wirbelstürmen ist an folgende Bedingungen geknüpft:

- Temperaturen in der obersten Ozeanschicht (bis ca. 50m Tiefe) von mindestens 26.5°C. Nur in solchen Gebieten steht genug Wärme und Feuchtigkeit zur Verfügung, um einen Wirbelsturm aufrechtzuerhalten. Über dem Land verliert der Sturm rasch an Stärke.
- Starke Abkühlung der Atmosphäre mit der Höhe. Dadurch wird der Aufstieg von Luftmassen und die Kondensation begünstigt.
- Hohe Luftfeuchtigkeit in der Höhe. Dadurch wird ebenfalls die Kondensation gefördert.
- Geringe Änderung der Windverhältnisse mit der Höhe. Ändert der Wind mit der Höhe, wird der Aufstieg von Luftmassen gebremst und der Sturm 'auseinandergerissen' und abgeschwächt.
- Eine Entfernung von mehr als rund 500 km bzw. etwa fünf Breitengrade vom Äquator. Die Rotation des Wirbelsturms kommt wie diejenige von Tiefdruckgebieten in unseren Breiten dank der Korioliskraft (bzw. der Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit der Erdoberfläche mit zunehmender Entfernung vom Äquator) zustande. Diese ist am Äquator gleich null und nimmt gegen die Pole hin zu.
- Es muss bereits eine Störung in der atmosphärischen Strömung vorhanden sein, aus welcher sich der Sturm bilden kann.

Die Klassifikation von Wirbelstürmen ist je nach Region unterschiedlich. Im Atlantik und im östlichen Nordpazifik heissen sie «Hurrikan», im Nordwestpazifik «Taifun», im Südpazifik und im indischen Ozean «Zyklon».

Hurrikane werden nach der Windgeschwindigkeit (in km/h) klassiert (Saffir-Simpson Skala):

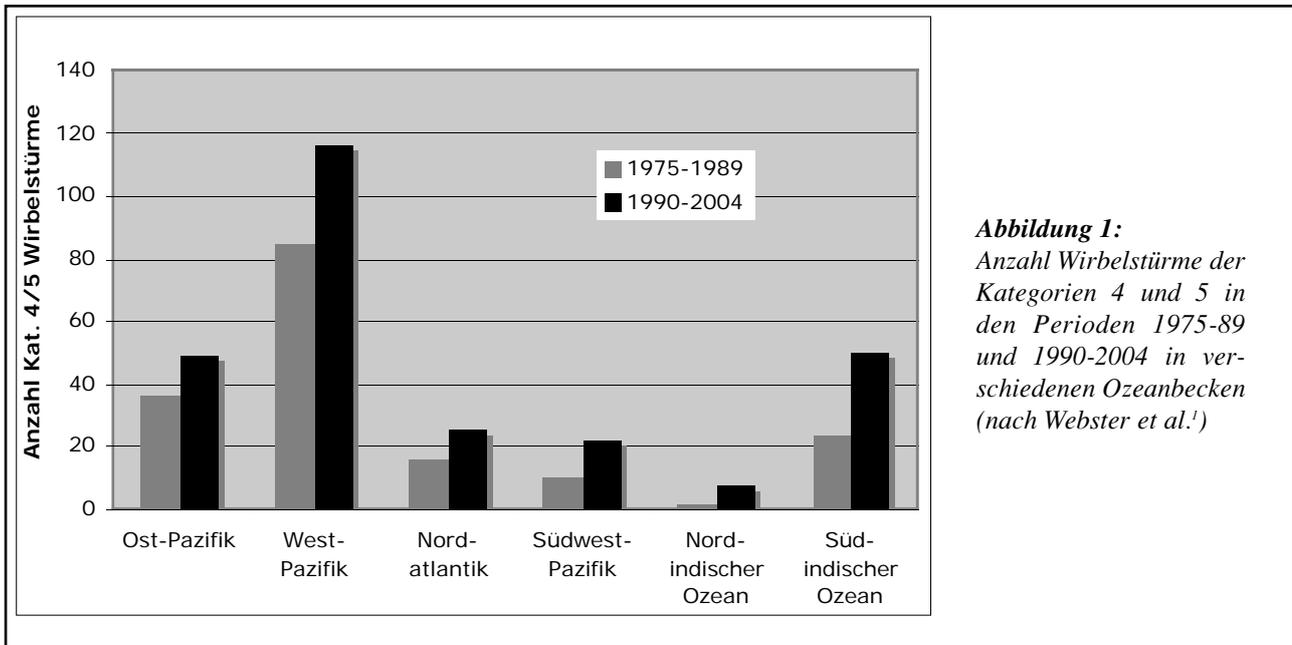
> 63 km/h	Tropischer Sturm	> 178 km/h	Hurrikan Kategorie 3
> 118 km/h	Hurrikan Kategorie 1	> 210 km/h	Hurrikan Kategorie 4
> 153 km/h	Hurrikan Kategorie 2	> 250 km/h	Hurrikan Kategorie 5

ge Prozent. Bezüglich der Häufigkeit wird global keine Änderung oder eine Abnahme errechnet, allerdings mit Ausnahme des Atlantiks, wo mit einer Zunahme gerechnet werden muss. Die Modelle, die für diese Untersuchungen verwendet werden, haben jedoch eine relativ grobe Auflösung, d.h. sie berechnen die Atmosphärenwerte nur alle ca. 100 km. Damit können Wirbelstürme mit einer Kernzone der höchsten Windgeschwindigkeiten von weniger als 100 km Ausdehnung nur relativ grob erfasst werden. Die Resultate sind also mit starken Unsicherheiten behaftet. Vor kurzem hat jedoch eine japanische Studie mit einem feineren Modell mit 20 km Auflösung die bisherigen Resultate bestätigt, nämlich eine Zunahme der Intensität und eine Abnahme der Häufigkeit mit Ausnahme des Atlantiks. Die in jüngsten Studien beobachtete Zunahme der Intensität von Wirbelstürmen in den letzten Jahrzehnten ist allerdings bedeutend grösser als dies die Modelle für das ganze 21. Jahrhundert berechnen. Da stellt sich die Frage, ob die Modelle den Einfluss der globalen Erwärmung unterschätzen oder ob die beobachtete Zunahme noch andere Gründe hat.

#### **Klarer Zusammenhang mit Ozeantemperaturen**

Kürzliche Forschungsarbeiten haben die weltweiten Wirbelstürme in der ersten und der zweiten Hälfte der letzten rund 40 Jahre verglichen. Dabei wurde eine Zunahme der

Anzahl Stürme der Kategorien 4 und 5 (siehe Kasten und Abbildung 1) um etwa 60%<sup>1</sup> und eine Zunahme der Zerstörungskraft der Wirbelstürme um 40-50% festgestellt<sup>2</sup> (siehe Abbildung 2). Die Zerstörungskraft bzw. «Leistung» eines Wirbelsturmes ist proportional zum Kubik der Windgeschwindigkeit. Eine Zunahme der maximalen Windgeschwindigkeit um 10% erhöht also die Zerstörungskraft um einen Drittel. Es konnte zusätzlich gezeigt werden, dass diese Zunahme der Wirbelsturmstärke parallel zum Anstieg der Meeresoberflächentemperaturen verläuft und dies der einzige Faktor ist, welcher die wachsende Sturmintensität erklären kann. Ein Zusammenhang mit der atmosphärischen Temperaturschichtung oder den Windverhältnissen ist nur für die kurzfristigen Schwankungen zu erkennen, nicht jedoch im langfristigen Trend<sup>3</sup>. Vereinzelt wurden diese Untersuchungen kritisiert, weil die Qualität der Beobachtungs- und Messdaten der Hurrikane immer mehr abnimmt, je weiter man in die Vergangenheit zurückgeht. Satelliten- und Flugzeugmessungen haben die Erfassung der Wirbelstürme in den letzten Jahrzehnten klar verbessert. Es ist deshalb möglich, dass einzelne Wirbelstürme in der Vergangenheit falsch klassiert worden sind. Auch wenn dies der Fall sein sollte, ändert sich am positiven Trend der Anzahl schwerer Wirbelstürme kaum etwas; die Zunahme könnte jedoch weniger stark sein als in diesen Untersuchungen berechnet.



**Abbildung 1:**  
Anzahl Wirbelstürme der Kategorien 4 und 5 in den Perioden 1975-89 und 1990-2004 in verschiedenen Ozeanbecken (nach Webster et al.<sup>1</sup>)

### Natürliche Ursache unwahrscheinlich

Einige Meteorologen schreiben die Zunahme der Hurrikane im Atlantik einer natürlichen Klimaschwankung, der "Atlantischen Multidekadalen Oszillation" (AMO) zu. Die Meeresoberflächentemperaturen im Nordatlantik scheinen sich in einem rund 60- bis 70jährigen Zyklus natürlicherweise zu erwärmen und wieder abzukühlen. Diese Schwankung, so wird aufgrund von Modellrechnungen vermutet, beruht auf Veränderungen der Meeresströmungen im Atlantik. Zahlreiche Erkenntnisse sprechen jedoch dafür, dass die AMO nicht die Hauptursache der gegenwärtigen Zunahme der Hurrikane ist:

#### Stürme in Mitteleuropa

Für die Stürme in den mittleren Breiten ergibt der Einfluss der globalen Erwärmung in den verschiedenen Klimamodellen noch recht unterschiedliche Resultate. Grundsätzlich beziehen auch Stürme, die über Mitteleuropa ziehen, einen grossen Teil ihrer Energie von der Feuchtigkeit, die sie über dem Atlantik aufgenommen haben. Dies haben z.B. Rekonstruktionen des europäischen Sturms «Lothar» mit Wettermodellen klar gezeigt. Erwärmt sich der Atlantik, so steigt auch das Energieangebot für Stürme in Europa.

Für die zukünftige Entwicklung zeichnen sich in den Modellrechnungen mehr oder weniger übereinstimmend zwei Tendenzen ab:

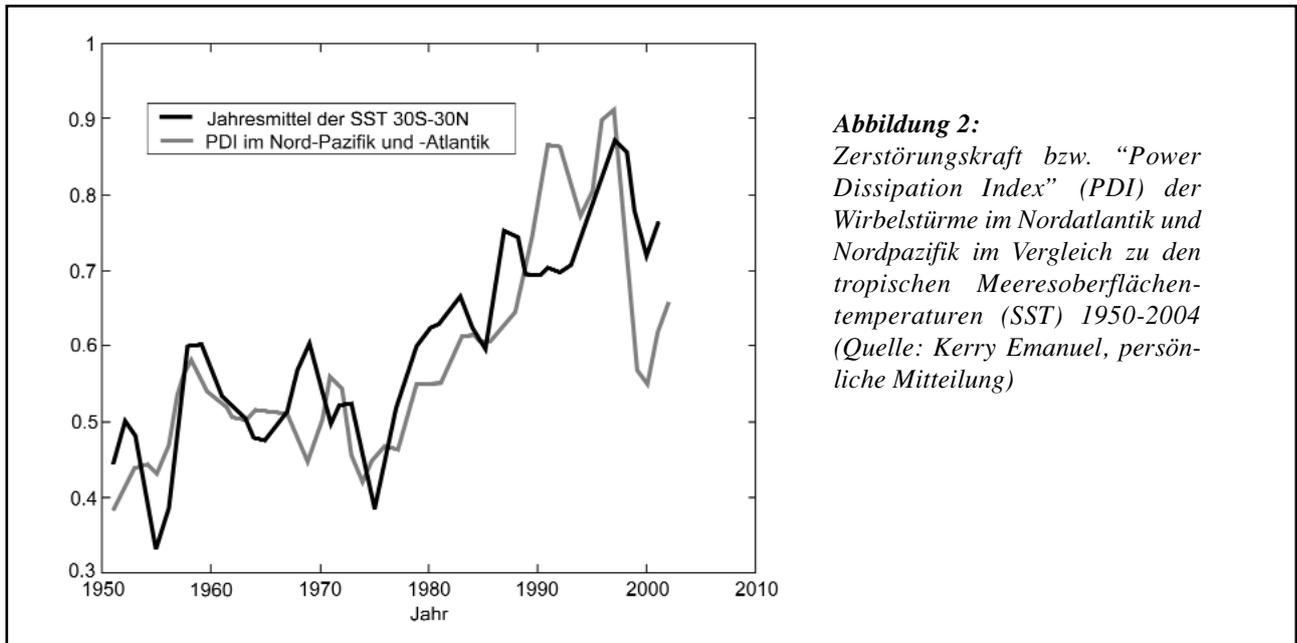
- Die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete verlagern sich nach Norden, deshalb nimmt die Anzahl Stürme über Mitteleuropa eher ab, in Nordeuropa hingegen zu.
- Extreme Stürme werden in Mitteleuropa eher häufiger erwartet, da die Bedingungen für deren Entstehung durch die Erwärmung des Atlantiks verbessert werden.

- Die Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Atlantik, wo die Hurrikane entstehen, verlaufen nahezu parallel zum globalen Temperaturverlauf. Verschiedene Analysen zeigen, dass der überwiegende Teil des Anstiegs der Meeresoberflächentemperaturen im tropischen Atlantik durch die globale Erwärmung erklärt werden kann und die AMO weniger als 10% des Anstiegs verursacht hat<sup>4,5</sup>.
- Sowohl die Messungen als auch die Modelle zeigen, dass die AMO vor allem Temperaturänderungen in mittleren und höheren Breiten bewirkt, jedoch kaum im tropischen Atlantik, der für die Entstehung von Hurrikanen entscheidend ist.
- Zwar wird vermutet, dass der AMO auch die Windverhältnisse im tropischen Atlantik beeinflusst, doch haben bisherige Studien wie oben erwähnt keinen Zusammenhang der gegenwärtigen Wirbelsturmzunahme mit Änderungen der Windverhältnisse zeigen können.
- Die starken Wirbelstürme haben weltweit zugenommen, nicht nur im Atlantik (siehe Abbildung 1). Ein natürlicher Zyklus im Atlantik kann diesen Anstieg nicht erklären.

#### Unterschätzen Modelle die Wirkung der Erwärmung?

Auch wenn man Unsicherheiten bei den Sturm-Daten in den 60er- und 70er-Jahren sowie natürliche Schwankungen berücksichtigt, ist die beobachtete Zunahme stärker als die Modellvorhersagen. Ein möglicher Grund könnte sein, dass die Warmwasserschicht durch die globale Erwärmung dicker geworden ist und deshalb dem Wirbelsturm, der die oberste Wasserschicht stark aufmischt, mehr Energie zur Verfügung steht. Dies wird in den Modellen nicht berücksichtigt.

Solange keine andere plausible Ursache für die Verstärkung der Wirbelstürme gefunden wird, muss damit



**Abbildung 2:**  
Zerstörungskraft bzw. "Power Dissipation Index" (PDI) der Wirbelstürme im Nordatlantik und Nordpazifik im Vergleich zu den tropischen Meeresoberflächentemperaturen (SST) 1950-2004 (Quelle: Kerry Emanuel, persönliche Mitteilung)

gerechnet werden, dass der menschliche Treibhauseffekt die Stürme stärker beeinflusst als bisher vermutet. Beunruhigend scheint, dass bei einem Anstieg der Ozeantemperaturen von nur rund einem halben Grad die beobachtete Zunahme bereits stärker ist, als von den Modellen für das ganze 21. Jahrhundert berechnet. Allerdings ist es möglich, dass Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation einen grösseren Einfluss haben als dies in den Analysen ersichtlich ist, denn Zirkulationsmuster sind statistisch nur sehr schwierig zu erfassen.

#### Schäden nicht nur von Sturmstärke abhängig

Die durch Wirbelstürme verursachten Schäden haben während der letzten Jahre stark zugenommen. Die Gründe für diese Zunahme können jedoch nicht klar bestimmt werden, da verschiedene Faktoren eine Rolle spielen. Einerseits nehmen die Schäden aufgrund der zunehmenden Bautätigkeit und dem starken Wertezuwachs in den gefährdeten Küstengebieten zu. Dieser Anstieg kann nicht klar von einem Anstieg aufgrund stärkerer Stürme unterschieden werden. Andererseits sind die Schäden stark davon abhängig, ob ein Wirbelsturm überhaupt auf Land auftrifft und ob dies in einem stark besiedelten Gebiet erfolgt. Die Routen, die ein Sturm verfolgt, hängen wiederum von den atmosphärischen Strömungsmustern ab, über deren Veränderung nur wenig bekannt ist. Die Anzahl der auf Land treffenden Wirbelstürme ist zu klein, um bereits ein Signal der globalen Erwärmung bei den Schäden identifizieren zu können.

#### Kontaktpersonen:

Prof. Huw Davies, Departement  
Umweltwissenschaften, ETH Zürich,  
Universitätstrasse 16, 8092 Zürich.  
Tel. 044 633 35 06, Fax: 044 633 10 58  
e-mail: huw.davies@env.ethz.ch

Dr. Urs Neu, ProClim, Schwarztorstr. 9, 3007 Bern.  
Tel. 031 328 23 26, Fax: 031 328 23 20  
e-mail: neu@scnat.ch

#### Literaturangaben:

- <sup>1</sup> P.J. Webster et al., Science, Vol. 309, S. 1844-1846, 2005.
- <sup>2</sup> K.A. Emanuel, Nature, Vol. 436, S. 686-688, 2005.
- <sup>3</sup> C.D. Hoyos et al., Science, Vol. 312, S. 94-97, 2006.
- <sup>4</sup> M.E. Mann and K.A. Emanuel, EOS, Vol. 87, S. 233/238/241, 2006.
- <sup>5</sup> K.E. Trenberth and D.J. Shea, Geophysical Research Letters, Vol. 33, S. L12704, 2006.