

3.6 Tropische Wirbelstürme

DIETER KASANG

***Tropical cyclones:** Due to very strong storms and heavy rainfall tropical cyclones are among the most dangerous weather extremes. In particular, the destructions caused by hurricanes in the United States and Central America have put the question whether changes in tropical cyclone activity could be attributed to global warming into focus in recent years. A previously supposed increase in the frequency of Atlantic hurricanes, however, could not be confirmed by more recent critical data analysis. More likely is a greater intensity of tropical cyclones in a warmer world as suggested in model calculations. To determine the effects of global warming on tropical cyclone activity is difficult because not only the sea surface temperature but also the state of the atmosphere has a significant influence.*

Tropische Wirbelstürme gehören zu den Wetterextremen, von denen die stärkste Zerstörungskraft für natürliche und soziale Systeme ausgeht. Sie treten in den tropischen Regionen aller drei Ozeane auf. Im Atlantik heißen sie Hurrikane, im Pazifik Taifune, im nördlichen Indischen Ozean Zyklone. Der Einfachheit halber wird der Begriff »Hurrikan« häufig auch universal gebraucht. Im Focus der Aufmerksamkeit stehen in der westlichen Welt die tropischen Wirbelstürme im Atlantik, wegen ihrer Gefährdung der westlichen Hemisphäre, aber auch weil sie am besten erforscht sind und über sie die längsten Datenreihen vorliegen.

1998 hat der Hurrikan Mitch in Honduras und Nicaragua 11.000 Todesopfer gefordert und einen Sachschaden von 5 Mrd. US-Dollar angerichtet. 2005 setzte der Hurrikan Katrina die amerikanische Stadt New Orleans zu 80% unter Wasser, tötete über 1.000 Menschen und verursachte einen Sachschaden von mindestens 81 Mrd. US-Dollar, womit er zum teuersten Hurrikan der USA wurde. Insgesamt ging das Jahr 2005 in die Geschichte als das Jahr der mit Abstand stärksten Hurrikanaktivität im Nordatlantik ein, mit 14 Hurrikanen insgesamt, wovon sieben der Kategorie 3–5 und drei der Kategorie 5 angehörten (HOLLAND & WEBSTER

Tab. 3.6-1: Wirbelsturm-Kategorien nach der Saffir-Simpson-Skala.

Kategorie	Windgeschwindigkeit in km/h	Druckminimum in hPa
1	118–153	über 980
2	154–177	965–979
3	178–209	945–964
4	210–249	920–944
5	über 249	unter 920

2007). Die Jahre nach 2005 waren dagegen wieder relativ ruhige Hurrikan-Jahre.

Besonders das katastrophale Hurrikan-Jahr 2005 hat verstärkt die Frage nach einem eventuellen Zusammenhang zwischen der Zunahme von tropischen Wirbelstürmen und der globalen Erwärmung aufgeworfen. Die seitdem intensivierte Forschung ist vor allem zwei Fragen nachgegangen:

- Lässt sich über die letzten Jahrzehnte und eventuell Jahrhunderte ein Trend in der Häufigkeit und/oder Stärke tropischer Wirbelstürme feststellen?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen der globalen Erwärmung und Änderungen in der Aktivität von tropischen Wirbelstürmen, und wie ist ein solcher Zusammenhang für die Zukunft einzuschätzen?

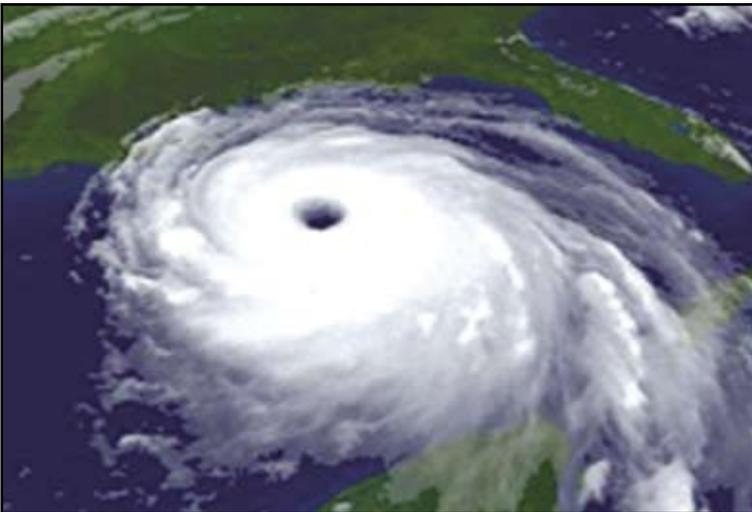


Abb. 3.6-1: Hurrikan Katrina am 28.8.2005 (<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Katrina-noaa-GOES12.jpg>).

Entstehung und Einflussfaktoren

Die wichtigste Voraussetzung für die Entstehung von tropischen Wirbelstürmen ist eine genügend große und warme Wasseroberfläche, wie sie in tropischen Ozeangebieten anzutreffen ist. Durch Verdunstung über den Ozeanen wird der Atmosphäre latente Energie zugeführt, die beim Aufsteigen der warmen Luftmassen durch Kondensation wieder frei wird und den Aufstieg weiter antreibt. Wolkenbildung und starke Niederschläge sind die Folge. Die Meeresoberflächentemperatur muss mindestens 26 °C betragen, wie sie nördlich und südlich des Äquators zu finden ist. Eine weitere Voraussetzung ist die Existenz einer horizontalen Corioliskraftkomponente, durch deren Wirkung es zu der typischen Wirbelbildung kommt. Da die horizontale Corioliskraftkomponente erst in einem Abstand von mindestens 5–8° vom Äquator ausreichend stark für die Ablenkung wird, gibt es in unmittelbarer Nähe des Äquators keine tropischen Wirbelstürme.

Von nicht geringer Bedeutung ist auch der Zustand der Atmosphäre über dem Ozean. So darf es in der Troposphäre keine starke vertikale Windscherung geben. D.h. die Richtung und die Stärke von Winden in allen Höhen über dem Boden sollten möglichst ähnlich sein, da andernfalls die vertikale Entwicklung tropischer Wirbelstürme gestört wird. Eine wichtige Rolle spielt auch die durch die Temperaturschichtung bedingte Stabilität der Atmosphäre. Je stärker das Temperaturgefälle mit der Höhe ist, desto stärker ist der Auftrieb warmer Luft, was die Entwicklung von tropischen Zyklonen begünstigt.

Dem Energieumsatz in tropischen Zyklonen kommt im Sommerhalbjahr eine wichtige Rolle bei der Abstrahlung von Energie über den aufgeheizten Ozeanflächen zu. Weil die tropische Atmosphäre einen sehr hohen Wasserdampfgehalt besitzt, kann die langwellige Ausstrahlung nicht viel Energie von der Erdoberfläche direkt in den Weltraum abführen. Diese Aufgabe übernehmen teilweise die tropischen Zyklonen. Sie transportieren durch Verdunstung und Kondensation Energie in die obere Troposphäre, von wo sie in den Weltraum abgestrahlt werden kann. Außerdem wird durch den starken Wind der Wirbelstürme die Meeresoberfläche aufgewühlt und kühleres Wasser aus der Tiefe nach oben befördert (IPCC 2007, Box 3.5.).

Tropische Zyklonen und globale Erwärmung

Hurrikane und Meeresoberflächentemperatur

In den meisten Regionen, in denen tropische Zyklonen vorkommen, haben sich die Meeresoberflächentempe-

peraturen (im Folgenden auch »SST« nach engl. Sea Surface Temperature) um mehrere zehntel Grad Celsius in den letzten Jahrzehnten erhöht. Das gilt besonders für das Entstehungsgebiet der nordatlantischen Hurrikane (KNUTSON et al. 2010). Hier zeichnet sich ein Trend von 0,7 °C pro 100 Jahre ab, der höher als im zonalen Mittel ausfällt (HOLLAND & WEBSTER 2007). Die Ursachen für die SST-Veränderungen im Atlantik sind nicht endgültig geklärt. Einige Autoren leiten sie primär aus der zunehmenden Konzentration von Treibhausgasen ab. Das von der WMO ernannte Hurrikan-Expertenteam stellt dagegen in seinem aktuellen Bericht fest, dass die Änderung der atlantischen SST in den letzten 30 Jahren nicht allein durch eine einfache Beziehung zum Anstieg der anthropogenen Treibhausgase zu erklären ist, sondern dass hier weit komplexere Zusammenhänge mit berücksichtigt werden müssen (KNUTSON et al. 2010).

Zwischen der Erhöhung der SST im Atlantik und der Anzahl von Hurrikanen wurde von einigen Forschern eine enge Beziehung hergestellt und die angenommene Zunahme der Hurrikane als anthropogen interpretiert. So unterscheiden HOLLAND & WEBSTER (2007) für das 20. Jahrhundert eine stufenweise Zunahme von tropischen Zyklonen um etwa das Doppelte in drei Phasen (s. *Abb. 3.6-2*). Die Veränderung der Hurrikan-Aktivität sehen sie zu mehr als 60% durch den Anstieg der Meeresoberflächentemperatur bedingt und deren Zunahme zu zwei Dritteln durch die Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen verursacht.

Gegen diese Argumentation sind jedoch in den letzten Jahren gravierende Einwände vorgebracht worden. Sie stützen sich im Wesentlichen auf zwei Argumente:

- die gängige Statistik über die Anzahl der Hurrikane seit Ende des 19. Jh.s muss korrigiert werden,
- die Hurrikane sind nicht allein und eventuell nicht primär durch die SST bestimmt.

Fragen an die Hurrikan-Statistik

Über die Anzahl tropischer Stürme und Hurrikane im Atlantik seit 1878 liegen Daten der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) vor. Sie zeigen neben starken jährlichen Unterschieden deutliche Dekadenschwankungen sowie einen signifikanten Trend von +3,84 Stürme pro 100 Jahre (VECCHI & KNUTSON 2008).

Ein erheblicher Teil der Zunahme der Sturmhäufigkeit in der Statistik ist jedoch künstlich bedingt durch Veränderungen in den Beobachtungsmethoden. Vor 1944 wurden die Stürme durch Schiffe oder durch das Zählen der auf Land treffenden Stürme erfasst. Nach dem 2. Weltkrieg kamen Flugzeugbeobachtungen hinzu. Erst seit 1965 gibt es eine flächendeckende Beobachtung durch Satelliten, die bis in die Gegenwart stetig

verbessert wurde. Vor dem Satellitenzeitalter wurde ein erheblicher Teil der tropischen Wirbelstürme im Nordatlantik nicht erfasst. Dies änderte sich im Zeitraum nach 1965, in dem auch Stürme in die Zählungen ein gingen, die bisher nicht berücksichtigt wurden (VECCHI & KNUTSON 2008). Das betrifft besonders schwächere Stürme mit weniger als zwei Tagen Dauer.

In den letzten Jahren ist daher von verschiedenen Autoren der Versuch unternommen worden, die Anzahl nicht erfasster tropischer Zyklonen zu bestimmen. So wurden von VECCHI & KNUTSON (2008) die »fehlenden« Stürme mit 3–4 pro Jahr um 1880 und während der beiden Weltkriege sowie mit 0,25 pro Jahr in den 1950er und 1960er Jahren angesetzt. Daraus ergibt sich über den gesamten Zeitraum von 1878–2006 ein Trend von nur +1,6 Stürmen pro 100 Jahre, der statistisch nicht signifikant ist (VECCHI & KNUTSON 2008). In einer neueren Untersuchung rechnen LANDSEA et al. (2010) die kurzlebigen Stürme insgesamt heraus, da bei ihrer Zählung besonders große Unsicherheiten bestehen, und die »fehlenden« mittel- bis langlebigen Stürme hinzu. Das Ergebnis ist: Es gibt bei den mittel- bis langlebigen Hurrikanen keinen Trend, sondern nur Dekadenschwankungen (Abb. 3.6-3).

Noch weniger als im Atlantik konnte für den nördlichen Westpazifik ein Trend der Häufigkeit tropischer

Zyklonen festgestellt werden. Eine Untersuchung der auf Land treffenden Taifune während der Zeit von 1954 bis 2004 an den Küsten von Vietnam, den Philippinen, China, Korea und Japan ergab zwar starke jährliche und ebenso ausgeprägte Schwankungen über Jahrzehnte, aber keinen erkennbaren Trend. Ein Einfluss der globalen Erwärmung auf die Aktivität von Taifunen kann nach CHAN & XU (2009) ausgeschlossen werden.

Das Hurrikan-Team der WMO schließt daraus, dass es letztlich ungewiss bleibt, ob die vergangenen Veränderungen in der Häufigkeit tropischer Zyklonen die Schwankungen überstiegen haben, die aus natürlichen Ursachen zu erwarten wären (KNUTSON et al. 2010).

Starke und schwache Hurrikane

Theoretische Überlegungen und Modellberechnungen ergeben allerdings, dass bei einer Erwärmung durch anthropogene Treibhausgase die starken tropischen Wirbelstürme der Kategorie 4 und 5 stärker und häufiger werden sollten. Daher haben einige Autoren untersucht, ob ein solcher Trend zu beobachten und der bisherigen globalen Erwärmung zuzuordnen ist. So haben WEBSTER et al. (2005) in der Zahl und dem Anteil starker Hurrikane der Kategorie 4 und 5 in allen Ozeanbecken eine deutliche Steigerung festgestellt. Während sich die Anzahl der tropischen Zyklonen der Kategorien 1–3 in

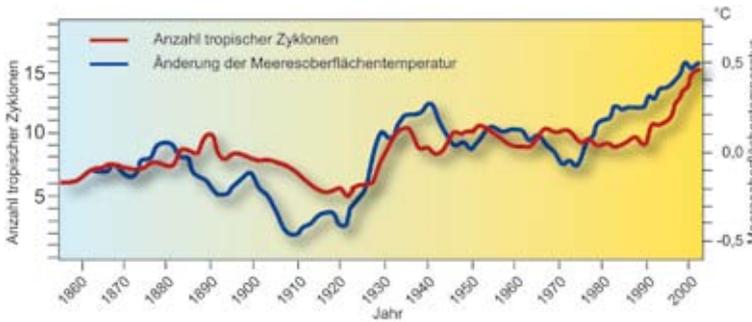


Abb. 3.6-2: Anzahl tropischer Zyklonen und Veränderung der Meeresoberflächentemperatur 1855-2005 im tropischen Ostatlantik, dem Entstehungsgebiet der nordatlantischen Hurrikane (nach HOLLAND & WEBSTER 2007).

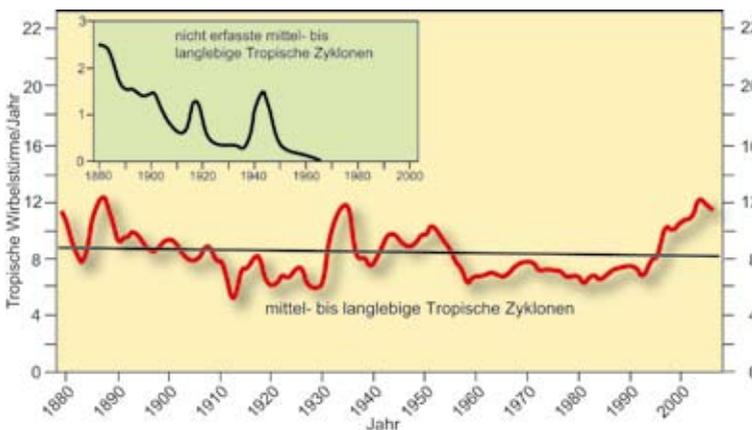


Abb. 3.6-3: Häufigkeit von mittel- und langlebigen Hurrikanen pro Jahr 1878–2008 (nach LANDSEA et al. 2010).

der Zeit der Satellitenbeobachtung 1970–2004 pro Jahr kaum verändert habe, zeige die der Kategorien 4 und 5 nahezu eine Verdopplung von ca. 50 auf 90 tropische Wirbelstürme pro Jahr. Auch der Anteil der starken Wirbelstürme an der Gesamtzahl aller tropischen Wirbelstürme sei von ca. 20% auf rund 35 % gestiegen (WEBSTER et al. 2005). Diese Ergebnisse wurden durch weitere Untersuchungen gestützt (vgl. KNUTSON et al. 2010).

Auch die weitgehend auf Satellitenbeobachtung beruhenden Abschätzungen einer zunehmenden Hurrikan-Intensität sind auf Kritik gestoßen. In den 1970er und 1980er Jahren gab es nur wenige Satelliten mit einer geringen Bildauflösung, die Tropische Zyklonen vor allem im Nordatlantik erfassten. Seit den 1990er Jahren wurde die Anzahl der Satelliten erhöht und die Bildauflösung verbessert. Die Intensität der Zyklonen wurde daher vor 1990 häufig deutlich unterschätzt. Nachträgliche Analysen früherer Satellitendaten und anderer Beobachtungen lassen vermuten, dass zwischen 1978 und 1990 etwa 70 Zyklonen der Kategorie 4 und 5 nicht als solche erkannt wurden (LANDSEA et al. 2006). Hinzu kommt, dass die Zeitperioden zu kurz für Aussagen über einen längerfristigen Trend sind.

Das Ursachenproblem

Die Datenlage macht es äußerst schwierig, den beobachteten Veränderungen bestimmte Ursachen zuzuordnen. Die noch vor einigen Jahren propagierte direkte Kopplung der Hurrikanaktivität mit der Meeresoberflächentemperatur und der Rückschluss auf anthropogene Einflüsse sind einem differenzierteren Bild gewichen. Zum einen gibt es zwischen der Anzahl tropischer Zyklonen und der Meeresoberflächentemperatur offensichtlich keine einfache Beziehung. So lässt sich die Entwicklung beider Faktoren seit Beginn der Satelliten-

beobachtung zwar im Nordatlantik zur Deckung bringen. Im NW-Pazifik kann man jedoch von Mitte der 1970er Jahre bis ca. 1990 eine starke Zunahme der Zahl tropischer Zyklonen von 10 auf etwa 20 pro Jahr feststellen, dann aber eine starke Abnahme auf ca. 12 um das Jahr 2000, obwohl die Meeresoberflächentemperatur stetig angestiegen ist (WEBSTER et al. 2005).

Auch im Atlantik scheint eine direkte Beziehung möglicherweise nur scheinbar zu existieren. Die tropische SST im Atlantik ist in den letzten 30 Jahren deutlich stärker angestiegen als in den anderen Ozeanen. Nach VECCHI (2008) ist es jedoch weniger die atlantische SST direkt, die die Hurrikan-Aktivität beeinflusst, als deren Relation zur übrigen tropischen SST und der Einfluss dieser Differenz auf die atmosphärische Dynamik (VECCHI et al. 2008).

Wenn auch nicht die Anzahl, so kann nach ELSNER et al. (2008) wenigstens die Intensität tropischer Zyklonen auf eine steigende SST zurückgeführt werden (ELSNER et al. 2008). Die stärksten Zyklonen werden danach mit einer höheren SST stärker. Die direkte Ableitung einer zunehmenden Intensität tropischer Wirbelstürme von der steigenden Meeresoberflächentemperatur ist jedoch nicht unproblematisch, weil der Einfluss anderer Faktoren wie der vertikalen Temperaturverhältnisse der Troposphäre, der vertikalen Windscherung, von El-Niño-Verhältnissen etc. i.d.R. nicht berücksichtigt wird. Hinzu kommt die kurze Periode der Satellitendaten, die es letztlich unmöglich macht, anthropogene Veränderungen von natürlichen Dekadenschwankungen zu trennen (KNUTSON et al. 2010).

Projektionen

Modell-Projektionen über die Entwicklung der Aktivität von tropischen Zyklonen in einer wärmeren Welt

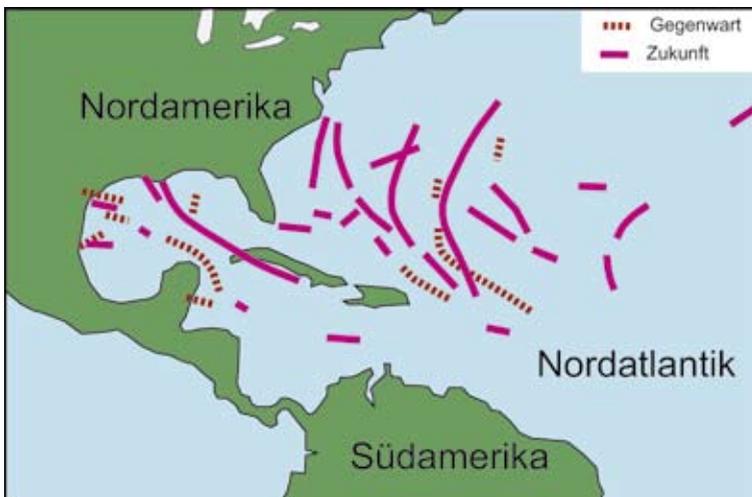


Abb. 3.6-4: Hurrikane der Kategorie 4 und 5 – Gegenwart: rot; Zukunft: violett (nach BENDER et al. 2010).

hatten lange Zeit eine zu grobe räumliche Auflösung, um wesentliche Eigenschaften von tropischen Zyklonen adäquat zu simulieren. In jüngster Zeit sind jedoch Modelle mit einer Auflösung bis hinunter auf 9 km entwickelt worden, die mehrheitlich zu dem Ergebnis kommen, dass die hohen Windgeschwindigkeiten ebenso wie die an tropische Zyklonen gekoppelten Niederschläge zunehmen werden und – mit weniger hoher Wahrscheinlichkeit – dass die Anzahl der schwachen tropischen Zyklonen sinken und die der starken steigen wird (IPCC 2007, 10.3.6.3). So ergibt eine aktuelle Modelluntersuchung über die künftige Entwicklung eine Zunahme der Anzahl atlantischer Hurrikane der Kategorien 4 und 5 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um fast das Doppelte und bei den Stürmen der Kategorie 5 sogar um das Dreifache. Ebenso wird hiernach der Niederschlag in einem Radius von 100 km um das Hurrikan-Zentrum um 20% zunehmen (BENDER et al. 2010).

Die Gründe für diese Entwicklung sind nicht endgültig geklärt. Eine wichtige Ursache für die Abnahme der Gesamtzahl tropischer Zyklonen in einer wärmeren Welt wird darin gesehen, dass die globale Erwärmung die vertikale Windscherung begünstigt (WAND & LEE 2008). Vertikale Windscherung unterbricht die Formation vor allem der schwächeren Stürme, während die starken Stürme sich ihre eigene Umwelt schaffen und den Einflüssen von Windscherungen eher widerstehen. Eine höhere Meeresoberflächentemperatur führt dagegen nicht zu einer höheren Anzahl tropischer Zyklonen. Zusammen mit dem Anstieg des Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre stellt sie allerdings mehr Energie zur Verfügung und begünstigt damit die Intensität der Zyklonen (BENGTSSON et al. 2007).

Schlussbetrachtung

Obwohl damit gerechnet wird, dass die Gesamtzahl der Hurrikane abnimmt, ist davon auszugehen, dass die Hurrikanschäden zunehmen werden. Der Grund ist darin zu sehen, dass die Schäden hauptsächlich durch die starken Hurrikane verursacht werden. So stammen 86% aller in den USA durch tropische Zyklonen verursachten Schäden von Hurrikanen der Kategorie 3–5, obwohl diese nur 24% der auf Land getroffenen Stürme ausmachen. Die Zunahme der starken Hurrikane wird daher möglicherweise eine Steigerung der Schäden um 30% nach sich ziehen (BENDER et al. 2010).

Allein diese durch die globale Erwärmung erhöhte potentielle Gefahr macht es zu einer wichtigen Aufgabe für die Wissenschaft, die bisherige und künftige Beziehung zwischen tropischen Zyklonen und dem Klimawandel weiter mit Nachdruck zu erforschen. Dabei werden nicht nur hohe Ansprüche an eine verbesserte

Beobachtung in allen wichtigen Ozeanbecken gestellt, sondern vor allem auch an die Modellierung von Hurrikanen. Die Modellauflösung muss weiter verfeinert und die Kopplung mit globalen Modellen, die den Klimawandel adäquat darstellen, verbessert werden. Dass die Anstrengungen in dieser Richtung vor allem in den USA erfolgen, ist angesichts der Bedrohungslage und des wissenschaftlich-technischen Potentials dieses Landes nur zu verständlich.

Literatur

- BENDER M. A., T. R. KNUTSON, R. E. TULEYA, J. J. SIRUTIS, G. A. VECCHI, S. T. GARNER & I. M. HELD (2010): Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science* 327, 454–458.
- BENGTSSON L., K. I. HODGES, M. ESCH, N. KEENLYSIDE, L. KORNBLUEH, J. J. LUO & T. YAMAGATA (2007): How may tropical cyclones change in a warmer climate, *Tellus* 59A, 539–561.
- CHAN J. C. L. & XU M. (2009): Interannual and interdecadal variations of landfalling tropical cyclones in East Asia. Part I: Time series analysis. *International Journal of Climatology* 29, 1285–1293.
- ELSNER J. B., J. P. KOSSIN & T. H. JAGGER (2008): The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature* 455, 92–95.
- HOLLAND G. J. & WEBSTER P. J. (2007): Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: natural variability or climate trend? *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365, 2695–2716.
- IPCC (2007): Cambridge Univ. Press, Cambridge. 996 pp. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 pp.
- KNUTSON T.R., J. L. MCBRIDE, J. CHAN und 7 weitere Autoren (2010): Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience* 3, 157–163.
- LANDSEA C. W., B. A. HARPER, K. HOARAU & J. A. KNAFF (2006): Can we detect trends in extreme tropical cyclones? *Science* 313, 452–454.
- LANDSEA C., G. A. VECCHI, L. BENGTSSON & T. R. KNUTSON (2010): Impact of Duration Thresholds on Atlantic Tropical Cyclone Counts. *Journal of Climate*, 23, 2508–2519. doi:10.1175/2009JCLI3034.1.
- VECCHI G. A., K. L. SVANSON & B. J. SODEN (2008): Whither Hurricane Activity?. *Science* 322, 687–689.
- VECCHI G. A. & KNUTSON T. R. (2008): On estimates of historical North Atlantic tropical cyclone activity. *Journal of Climate* 21, 3580–3600.
- WANG C. & LEE S.-K. (2008): Global warming and United States landfalling hurricanes, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2007GL032396.
- WEBSTER P. J., G. J. HOLLAND, J. A. CURRY & H.-R. CHANG (2005): Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309, 1844–1846.

Dr. Dieter Kasang
Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)
Bundesstrasse 53 - 20146 Hamburg
dieter.kasang@zmaw.de