

Jasmin Gröschl und Jana Lippelt

Änderungen des Klimas sind innerhalb der Erdgeschichte nichts Ungewöhnliches. Jedoch geht der derzeitige Wandel gemessen an früheren Klimaschwankungen relativ schnell von statten. Seit 1900 ist die globale Durchschnittstemperatur um 0,8°C gestiegen, und die zehn wärmsten Jahre wurden innerhalb der letzten 15 Jahre gemessen (vgl. NASA 2013). Das Intergovernmental Panel for Climate Change (vgl. IPCC 2012) hält einen weltweiten Anstieg der Temperatur um 2 bis 7°C gegenüber den vorindustriellen Temperaturen bis 2100 für möglich. Allerdings wird der Klimawandel kontrovers diskutiert. Die Annahme des IPCC wird durch die Tatsache geschwächt, dass die Klimamodelle mit gegenwärtigen Entwicklungen nicht konsistent sind (vgl. Bothe et al. 2012). Allerdings liefert keine der verfügbaren Datenreihen zur Temperatur Hinweise auf eine empirisch signifikante Verlangsamung der globalen Erwärmung. Hier steht Augenschein gegen empirische Analyse, Daten werden unterschiedlich ausgelegt, Klimamodelle geben keine schlüssige Auskunft, und einige Studien prognostizieren gar einen Stillstand der Erderwärmung (vgl. Lüning und Vahrenholt 2012). Letztere führen als Ursache Zyklen der ab- und zunehmenden Temperaturen (ozeanische Oszillationen und verschiedene Sonnenzyklen, bei denen die Sonnenaktivität

oszilliert), die eine Periode von elf bis 2 300 Jahre umfassen, an.

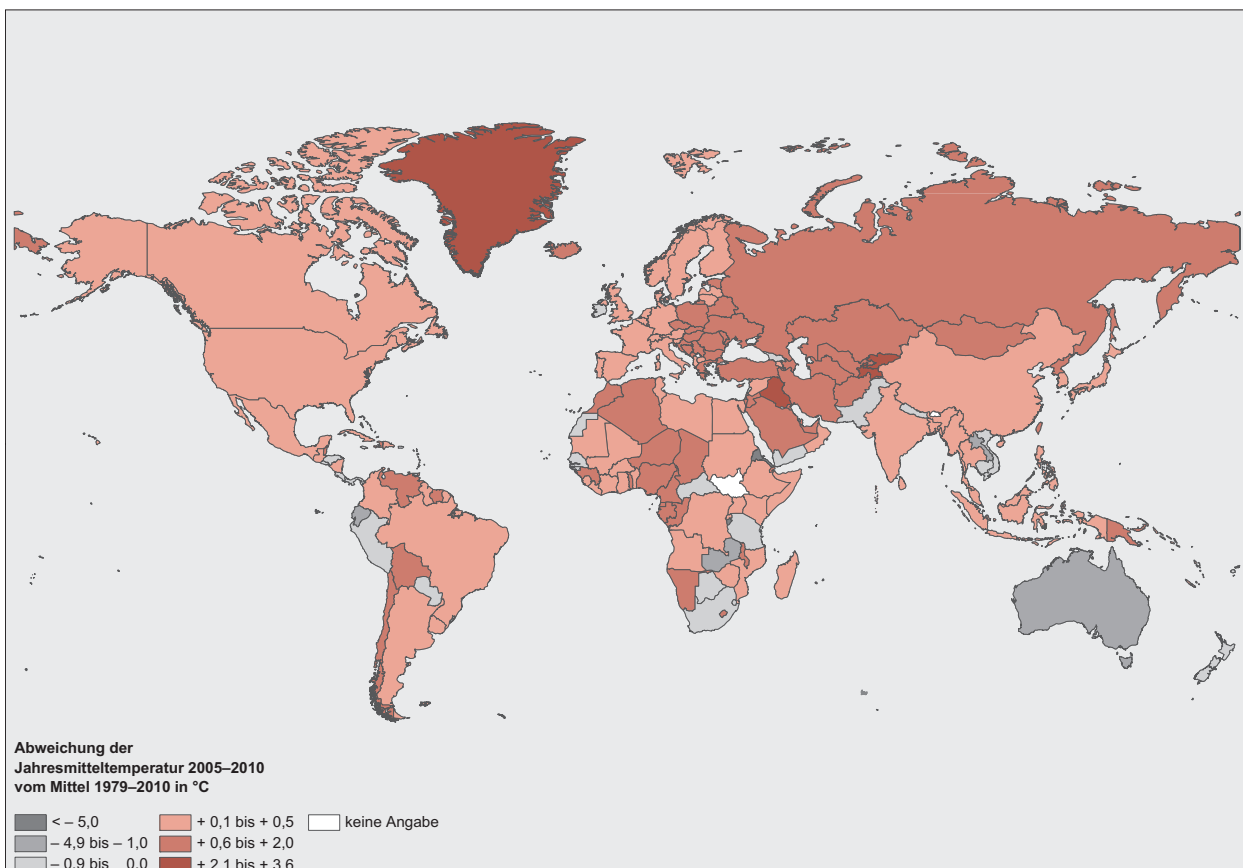
Lassen wir für den Moment die Klima-Kontroverse beiseite. Eine Erwärmung des Klimas könnte bedeuten, dass die Winter wärmer und feuchter, die Sommer hingegen heißer und trockener werden. Die Gefahr von extremen Wetterereignissen, wie Überschwemmungen, Dürren, Waldbränden, Hitze- und Kältewellen und Hurrikanen, nimmt zu. Derzeit sehen wir extreme Entwicklungen vor allem im Mittelmeerraum und im südlichen Afrika (vgl. Munich RE 2012; 2013). Aber auch in den Vereinigten Staaten steigt die Gefahr von Dürren und Waldbränden (vgl. Westerling et al. 2006). Des Weiteren könnte durch eine steigende Temperatur der Meeresoberfläche die Intensität (nicht aber die Häufigkeit) von Hurrikanen zunehmen und damit vergleichsweise mehr Zerstörung anrichten.

Temperaturen

In den meisten Ländern der Erde war es zwischen 2005 und 2010 im Vergleich zum langjährigen Mittel der Jahre

Abb. 1

Veränderung der Temperatur 1979–2010



Quelle: Global Summary of the Day (GSOD) Datenbank des National Climatic Data Center der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

1979 bis 2010 zu warm. Die Daten der Global Summary of the Day (GSOD) Datenbank des US-amerikanischen National Climatic Data Center zeigen in Abbildung 1, dass die Abweichung der Jahresdurchschnittstemperatur für 2005–2010 im Vergleich zur langjährigen Referenzperiode (1979–2010) in weiten Teilen Europas, Asiens, dem Mittleren Osten und Afrikas einen teils starken Anstieg zu verzeichnen hat. Sehr gut erkennbar ist insbesondere die große Erhöhung der Temperatur in Grönland, dort war es gegenüber der Referenzperiode 2,4°C zu warm. Eine noch größere Erwärmung war nur im Irak mit 2,7°C und in Kirgistan mit 3,6°C zu verzeichnen.

Im Gegensatz dazu lagen die Jahrestemperaturen gegenüber dem langjährigen Mittel in Indochina (Vietnam, Laos und Kambodscha), dem südlichen Afrika, Australien, Neuseeland und auch Peru, Ecuador und Paraguay unter dem Referenzwert. Zu erwähnen ist vor allem das starke Auseinanderdriften der Jahresmitteltemperaturen vom langjährigen Durchschnitt von über 5°C in Eritrea und Burundi.

Niederschläge

Auch bei den weltweiten Jahresniederschlägen zeigen die Daten des Global Precipitation Climatology Project (GPCP) des Goddard Space Flight Center der NASA im Mittel der Jahre 2005 bis 2010 insbesondere in vier Regionen relevante großräumige Abweichungen vom Referenzzeitraum 1979 bis 2010 nach unten auf. Abbildung 2 stellt die Abweichung des Jahresdurchschnittsniederschlags 2005 bis 2010 vom langjährigen Mittel in Prozent dar. Insbesondere in den Vereinigten Staaten, den südlichen Ländern Südamerikas, in Nord- und Ostafrika, den Ländern des Mittleren Ostens und Zentralasiens lagen die Regenmengen weit unter den langjährigen Vergleichswerten. Dies kann in Kombination mit hohen Temperaturen vermehrt Dürren, Wald- und Buschfeuer, wie auch Staubstürme zur Folge haben. Insbesondere kam es in Kuwait, Saudi-Arabien und Nepal zu negativen Abweichungen von mehr als 30% der Niederschläge des langjährigen Referenzwerts. Aber auch die Vereinigten Staaten und das Vereinigte Königreich hatten in derselben Periode durchschnittlich mit etwa 4% weniger Niederschlägen zu kämpfen.

Hingegen verzeichneten regenreiche Regionen höhere Niederschlagsmengen im Vergleich zum langfristigen Mittel, was die Ergebnisse verschiedener Studien unterstützt (vgl. Allan et al. 2010). Insbesondere in den Ländern des südlichen Afrikas, den nordwestafrikanischen Ländern, Osteuropa und den südostasiatischen Ländern ist eine starke Zunahme des Jahresmittelniederschlags festzustellen. Hieraus kann sich ein steigendes Risiko von Überschwemmungen und Erdbeben ergeben. Insbesondere in Namibia und Botswana stiegen die durchschnittlichen Jahresniederschlä-

ge im genannten Zeitraum relativ zum Referenzzeitraum um knapp 30%.

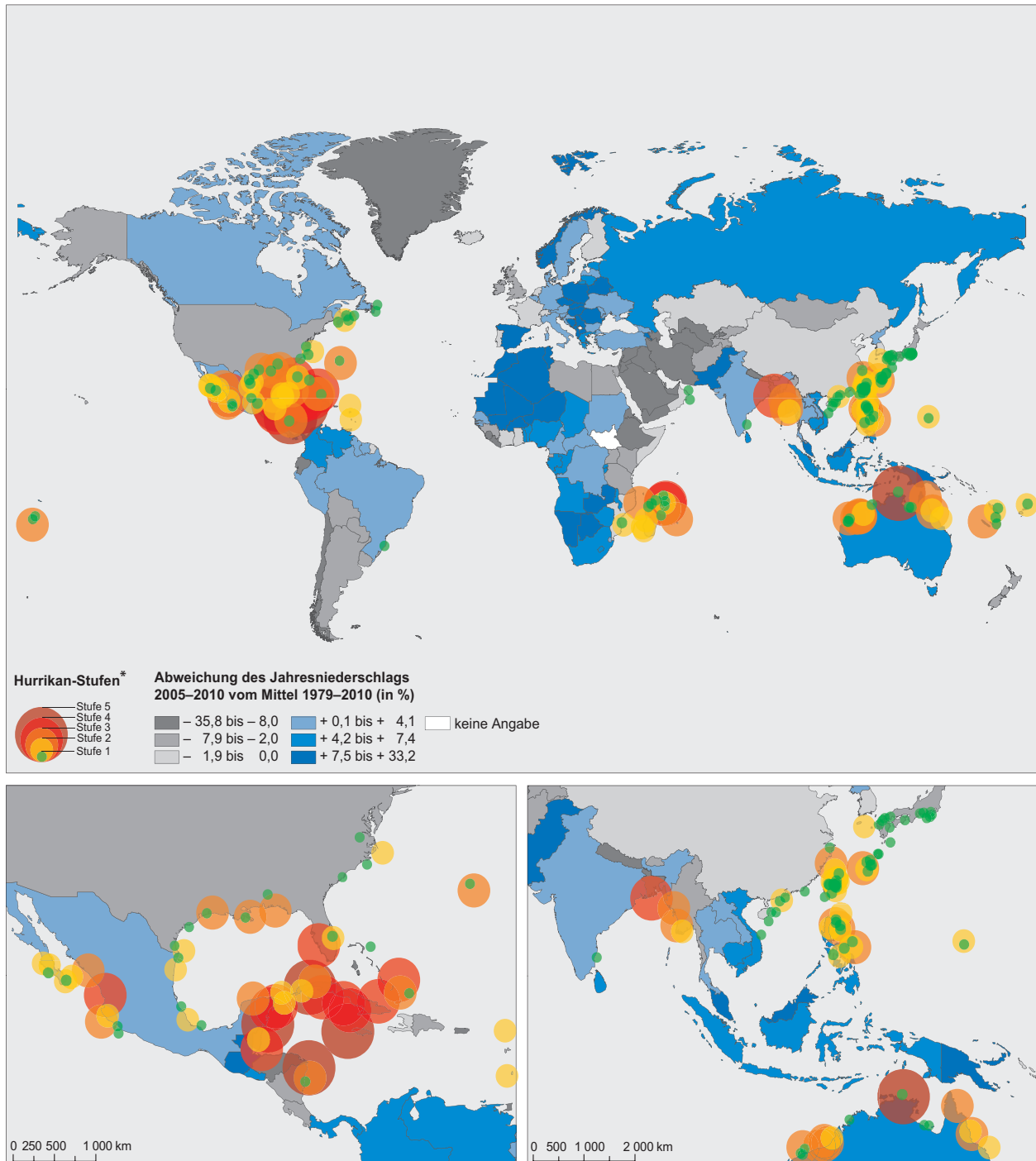
Hurrikane

Die Frage, ob es durch den Klimawandel zu einer Zunahme tropischer Wirbelstürme kommt, wird oft gestellt und lässt sich bisher nicht endgültig beantworten. Nicht zuletzt seit Hurrikan Katrina (2005) und Hurrikan Sandy (2012), aber auch Zyklon Yasi in Australien (2011) sind diese Stürme in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung gerückt. Die Begriffe Hurrikan, Taifun und Zyklon sind regional spezifische Namen für tropische Wirbelstürme. Hierbei handelt es sich um Tiefdruckgebiete in tropischen oder subtropischen Ozeanbecken, in denen starke Konvektionsvorgänge, Gewitter und Windzirkulation auftreten. Dies ist nicht zu verwechseln mit einer Zyklone, die ein dynamisches Tiefdruckgebiet ist und, in allen außertropischen Regionen vorkommend, dort das Wettergeschehen bestimmt (vgl. AOML 2011). Klassifiziert wird ein Hurrikan im atlantischen Raum als solcher, sobald ein tropischer Sturm Windstärken ab 118 km/h bzw. 64 Knoten erreicht. Hurrikane werden nach der Saffir-Simpson-Skala in fünf Klassen eingeteilt, die einerseits die Windgeschwindigkeiten und andererseits die Schäden an Gebäuden, der Infrastruktur und der Ökosysteme aufzeigt. Bei Taifunen und Zyklonen in Asien und Australien wird ebenfalls eine Skala von fünf Kategorien mit zum Teil abweichenden Angaben angewandt. Generell besteht dabei kaum ein Zusammenhang zwischen der Größe und der Intensität eines Hurrikans. Hurrikan Andrew (1992) zum Beispiel besaß relativ kleine Ausmaße, war jedoch in seiner Ausprägung sehr intensiv (145 Knoten beim Auftreffen auf Land, d.h. Kategorie 5) und verursachte einen Schaden von knapp 45 Mrd. US-Dollar (vgl. KIT 2013). Zu den Hauptgefahren tropischer Wirbelstürme zählen im Wesentlichen weniger der Wind, sondern zumeist Starkniederschläge und Überflutungen.

In Abbildung 2 sind alle Hurrikane und Taifune der Jahre 2001 bis 2011 abgebildet. Auffällig ist dabei das typische Vorkommen dieser Stürme in der Karibik und in Südostasien. Auch Australien, Indien und Madagaskar werden regelmäßig von tropischen Wirbelstürmen getroffen. Im Gegensatz zu den Wirbelstürmen im Westpazifik, die das ganze Jahr hinweg auftreten, gilt im atlantischen Bereich hauptsächlich der Zeitraum von Juni bis November als Hurrikan-Saison, wobei die meisten Stürme in der Zeit von August bis Oktober auftreten. Auch im Ostpazifik existiert eine solche Saison, die hier allerdings auch weiter, von Mai bis November, gefasst werden kann (vgl. AOML 2011).

In den letzten Jahrzehnten wurde weltweit eine Abnahme der Gesamtzahl tropischer Wirbelstürme beobachtet. Dies liegt zum einen daran, dass sich die Qualität und Auflö-

Abb. 2
Hurrikane der letzten Jahre (2001–2011) und Veränderungen der Niederschläge



* Die Darstellung der Hurrikane beruht auf der Saffir-Simpson-Skala.

Quelle: *Niederschläge*: Global Precipitation Climatology Project (GPCP) des Goddard Space Flight Center der NASA. In Anlehnung an Miguel et al. (2004) und Brückner und Ciccone (2011) und unter Verwendung von Geoinformation System (GIS) Software wurden die Daten auf Länder und Jahresebene aggregiert. *Hurrikane*: International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS data version v03r03) des National Climatic Data Center der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

sung von Messinstrumenten und Satellitendaten sowie die Konsistenz der Daten wesentlich verbessert haben. Zum anderen wurden in früheren Studien, in denen man von

einer Zunahme aufgrund der Erwärmung ausging, zum Teil inkonsistente Daten verwendet. Weiterhin wurde die Unterscheidung zwischen tropischen Zyklonen und tropi-

schen Tiefdruckgebieten wesentlich verbessert, was in der Vergangenheit oft zu Fehlinterpretationen geführt hat. Es wird im Allgemeinen eine hohe natürliche multidekadische Variabilität tropischer Wirbelstürme in einigen Regionen beobachtet, die das Erfassen langjähriger Trends erschwert (vgl. AOML 2011). Bisher konnte kaum ein tropischer Wirbelsturm auf den Klimawandel zurückgeführt werden, und es bleibt unklar, ob die Veränderungen der Vergangenheit die natürliche Variabilität der Wirbelsturmaktivität übersteigt.

Laut verschiedenen Studien hat sich die Meeresoberflächentemperatur weltweit im Zeitraum 1990–2005 um 0,2–0,3°C erhöht. Dennoch ist in den meisten Ozeanbecken kein Anstieg der Wirbelsturmaktivität zu beobachten (vgl. Klotzbach 2006). Studien gehen davon aus, dass sich statt der Häufigkeit von Wirbelstürmen vor allem deren Intensität aufgrund der steigenden Wassertemperatur verstärken könnte (vgl. Knutson et al. 2010; IPCC 2012). Eine Ausnahme stellt hierbei der Nordatlantik dar, bei dem weithin bekannt ist, dass die Meeresoberflächentemperatur in dieser Region einer der Faktoren ist, welche die Zahl von Hurrikanen beeinflussen (vgl. WMO 2006). Lediglich dort ist neben der Zunahme von Hurrikanen der Kategorie 4 und 5 auch eine Zunahme an Wirbelstürmen der unteren Kategorien nachweisbar, im Bereich des Nordostpazifiks wurde dagegen eine signifikante Abnahme nachgewiesen (vgl. Klotzbach 2006).

Für die Entstehung und die Aufrechterhaltung von Hurrikanen werden Windscherungen als wesentlich bedeutsamer eingestuft als die Wassertemperatur (vgl. Klotzbach 2006). Dabei handelt es sich um vertikale oder auch horizontale Verwirbelungen, die aufgrund unterschiedlicher aufeinander-treffender Winde aus verschiedenen Richtungen über kurze Distanzen auftreten und die Wolkenformation in ihrem Anfangsstadium bzw. Entstehungsgebiet zerstören können (vgl. DWD 2013). Windscheren treten häufig in Verbindung mit El-Niño-Ereignissen auf. Diese Anomalien führen alle zwei bis sieben Jahre dazu, dass das Auftreten von Hurrikanen im Atlantik und der Karibik durch vom Westen nach Osten wehende Winde abgeschwächt wird, wohingegen es im Ostpazifik zu einem verstärkten Vorkommen von tropischen Zyklonen kommt. Neue Studien nehmen aufgrund von Modellrechnungen an, dass das Auftreten von Windscheren durch die globale Erwärmung begünstigt wird und somit die Häufigkeit von Hurrikanen beeinflusst (vgl. NOAA 2007). Auch die Niederschlagsmenge in Verbindung mit Wirbelstürmen kann nach Ansicht der Wissenschaft in einigen Regionen um bis zu 20% zunehmen. Zudem spielt hier auch der prognostizierte Meeresspiegelanstieg eine wichtige Rolle. Der starke Anstieg der Schäden der letzten Jahre ist neben einer Zunahme der Wirbelsturmintensität vor allem auf das Bevölkerungswachstum an den Küsten sowie den Ausbau

der Infrastruktur und damit einem Anstieg der Vulnerabilität zurückzuführen (vgl. AOML 2011).

Abschließend lässt sich sagen, dass eine mögliche Erwärmung des Klimas nicht nur die Häufigkeit, die Intensität, die räumliche Ausdehnung und die Dauer von extremen Wetterereignissen, wie Starkregen, Dürreperioden oder tropischen Wirbelstürmen, beeinflussen kann, sondern auch eine Gefahr für die Wasserversorgung und das Nahrungsangebot ist und möglicherweise mit einem Verlust von Ökosystemen und Verlusten in der Tier- und Pflanzenwelt einhergeht.

Literatur

Allan, R.P., B.J. Soden, V.O. John, W. Ingram und P. Good (2010), »Current Changes in Tropical Precipitation«, *Environmental Research Letters* 5(2), 1–7.

Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory – AOML (2011), »Hurricane Research Division«, online verfügbar unter: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/>.

Bothe, O., J. Jungclauss, O. Zanchettin und E. Zorita (2012), »Climate of the Last Millennium: Ensemble Consistency of Simulations and Reconstructions«, *Climate of the Past Discussions* 8, 2409–2444.

Brückner, M. und A. Ciccone (2011), »Rain and the Democratic Window of Opportunity«, *Econometrica* 79(3), 923–947.

Deutscher Wetterdienst (2013), »Wetterlexikon – Windscherung«, online verfügbar unter: <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=W&DAT=Windscherung>.

IPCC (2012), »Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Summary for Policymakers«, online verfügbar unter: http://ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-SPMbrochure_FINAL.pdf.

Karlsruher Institut für Technologie – KIT (2013), »Wettergefahren-Frühwarnung«, online verfügbar unter: http://www.wettergefahren-fruehwarnung.de/Artikel/hurrikan_me.html.

Klotzbach, P. (2006), »Trends in Global Tropical Cyclone Activity over the Last Twenty Years (1986–2005)«, *Geophysical Research Letters* 33, 1–4.

Knutson, T., J. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. Kossin, A. Srivastava und S. Masato (2010), »Tropical Cyclones and Climate Change«, *Nature Geoscience* 3, 157–163.

Lüning, S. und F. Vahrenholt (2012), *Die kalte Sonne: Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet*, Hoffmann und Campe Verlag, Hamburg.

Miguel, E., S. Satyanath und E. Sergenti (2004), »Economic Shocks and Civil Conflict: An Instrumental Variables Approach«, *Journal of Political Economy* 112(4), 725–753.

Munich RE (2012), *Topics GEO: Naturkatastrophen 2011 – Analysen, Bewertungen, Positionen*, Geo Risk Research München.

Munich RE (2013), *Topics GEO: Naturkatastrophen 2012 – Analysen, Bewertungen, Positionen*, Geo Risk Research München.

National Aeronautic and Space Administration – NASA (2013), »NASA Finds 2012 Sustained Long-Term Climate Warming Trend«, online verfügbar unter: <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/2012-temps.html>.

National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA (2007), »Climate Models Suggest Warming-induced Wind Shear Changes Could Impact Hurricane Development, Intensity«, *NOAA Magazine*, online verfügbar unter: <http://www.noaanews.noaa.gov/stories2007/s2840.htm>.

Westerling, A., H. Hidalgo, D. Cayan und T. Swetnam (2006), »Warming and Earlier Spring Increases Western U.S. Forest Wildfire Activity«, *Science* 313(5789), 940–943.

World Meteorological Organization – WMO (2006), »Statement on Tropical Cyclones and Climate Change«, WMO International Workshop on Tropical Cyclones, IWTC-6, San Jose, Costa Rica, November 2006, online verfügbar unter: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/tmp/documents/iwtc_statement.pdf.