



MEINUNG: KLIMAFORSCHUNG

Bringt die globale Erwärmung mehr Wetterextreme?

von Stefan Rahmstorf

Der Einfluss des Klimawandels auf Wetterextreme ist bereits jetzt deutlich zu sehen, sagt Klimaforscher Stefan Rahmstorf.

POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG

VALDEZRI / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO), die die Sammlung von Wetterdaten weltweit koordiniert, veröffentlichte Anfang November ihren vorläufigen Klimabericht für 2017. WMO-Generalsekretär Petteri Taalas sagte dazu:

»Wir waren Zeuge außerordentlichen Wetters – das beinhaltet Temperaturen, die in Asien 50 Grad Celsius überschritten, rekordbrechende Hurrikane in schneller Abfolge in der Karibik und im Atlantik, die bis nach Irland reichten, verheerende Überschwemmungen auf Grund des Monsuns, die viele Millionen Menschen betrafen, und unbarmherzige Dürren in Ostafrika. Viele dieser Ereignisse – und detaillierte wissenschaftliche Studien werden ermitteln, wie viele genau – tragen den Fingerabdruck des durch die menschlichen Treibhausgasemissionen verursachten Klimawandels.«

Dagegen behauptet Jörg Kachelmann, Unternehmer und TV-Persönlichkeit in Sachen Wetter, die Zunahme der Wetterextreme sei nur Medienhype, ein Problem der veränderten Wahrnehmung, und es gebe

CLINTSPENCER / GETTY IMAGES / ISTOCK



gar keine Trends bei den Wetterextremen – so zum Beispiel in der Talkshow von Sandra Maischberger und jüngst in einem Interview mit »Spektrum.de«. Was stimmt? Wirkt sich die globale Erwärmung bereits auf Wetterextreme aus oder nicht?

Kurze, aber notwendige methodische Vorbemerkungen

In meiner Arbeitsgruppe erforschen wir diese Frage seit vielen Jahren. Man sollte dabei zunächst zwischen den verschiedenen Typen von Wetterextremen unterscheiden. Es liegt auf der Hand, dass die Häufigkeit von extremer Hitze zunimmt, während die von extremer Kälte abnimmt – beides nicht unbedingt an jedem Ort der Erde, aber doch im Allgemeinen. 2012 haben wir in der Fachzeitschrift »Nature Climate Change« in einem Übersichtsartikel den Stand der Forschung zum Zusammenhang von Klimawandel und Wetterextremen diskutiert (1). Bevor ich auf einige Typen von Extremen konkret eingehe, noch einige Anmerkungen zur wissenschaftlichen Methode.

Will man wissen, wie sich der Klimawandel auf Wetterextreme auswirkt, gibt es verschiedene Typen von Evidenz:

1. Physikalische Grundprinzipien, wie die Tatsache, dass wärmere Luft mehr Wasserdampf speichern kann und wärmeres Wasser leichter verdunstet. Vorteil: Diese physikalischen Gesetze sind zweifelsfrei gültig. Nachteil: Sie sind nur eine Teilbetrachtung, andere Veränderungen im Klimasystem könnten diesen Effekten entgegen wirken.

2. Simulationsrechnungen mit Klimamodellen. Vorteil: Die Modelle können im Prinzip alle bekannten physikalischen Effekte und Rückkopplungen abbilden. Nachteil: Modelle können die Realität nur annähern, denn Rechenzeit und Auflösung sind begrenzt und noch unverstandene Mechanismen werden möglicherweise nicht erfasst.

3. Beobachtungsdaten. Vorteil: Messungen bilden die Realität ab. Nachteil: Messdaten sind nur recht begrenzt verfügbar, häufig sind die Daten aus der Vergangenheit inhomogen, ungenau oder reichen nicht sehr weit zurück.

Klimaforscher kombinieren alle drei Methoden, um den Einfluss der globalen Erwärmung auf Wetterextreme zu verstehen, denn aus einer alleine kann man kaum belastbare Schlüsse ziehen.

Was verraten beobachtete Trends?

Die Schwächen und Grenzen der Beobachtungsdaten sind bei Extremereignissen besonders gravierend. Denn Extreme sind – per Definition – selten. Um statistisch signifikante Änderungen zu belegen, braucht man aber viele Daten. Außerdem gibt es bei Extremen immer eine große Zufallskomponente – denn extrem wird das Wetter ja gerade dann, wenn mehrere Faktoren zusammenkommen. Die Diagnose »kein signifikanter Trend« wird zudem häufig missverstanden als »kein Trend«. Dabei bedeutet »nicht signifikant« ja lediglich, dass man nicht mindestens 95 Prozent sicher sein kann, ob der beobachtete Trend nicht einfach ein Zufallsprodukt sein könnte. Bei der Beurteilung, ob ein Trend zufällig ist oder nicht, ist die Evidenz von Typ 1 und 2 wichtig. (Fachlich prägt letztere unsere physikalische Erwartung und damit die Wahl der »Nullhypothese«, die anhand der Daten geprüft werden soll.) Nicht vergessen sollte man auch, dass Zufallsschwankungen einen Klimatrend nicht nur verstärken, sondern ihn ebenso wahrscheinlich auch abschwächen können. »Kein Trend« kann also auch bedeuten, dass ein Klimatrend zeitweise durch zufällige Schwankungen kaschiert

wurde und beweist damit nicht, dass der Klimawandel keinen Einfluss hatte.

Ein häufiger Fehler ist auch, von Trends in mittleren Werten auf die Trends in den Extremen zu schließen. Diese unterscheiden sich meist deutlich. Häufig ist die Zunahme in den extremsten Werten am größten. Ein typisches Beispiel sind Niederschlagstrends, die wir beispielsweise in einer Fallstudie zu den Rekordfluten auf dem Balkan im Mai 2014 analysiert haben (2).

Schon wenn man eine Normalverteilung (wie man sie etwa bei Temperaturdaten häufig findet) einfach unverändert zu höheren (wärmeren) Werten verschiebt, nimmt die Häufigkeit der wärmsten Extreme dadurch prozentual am stärksten zu.

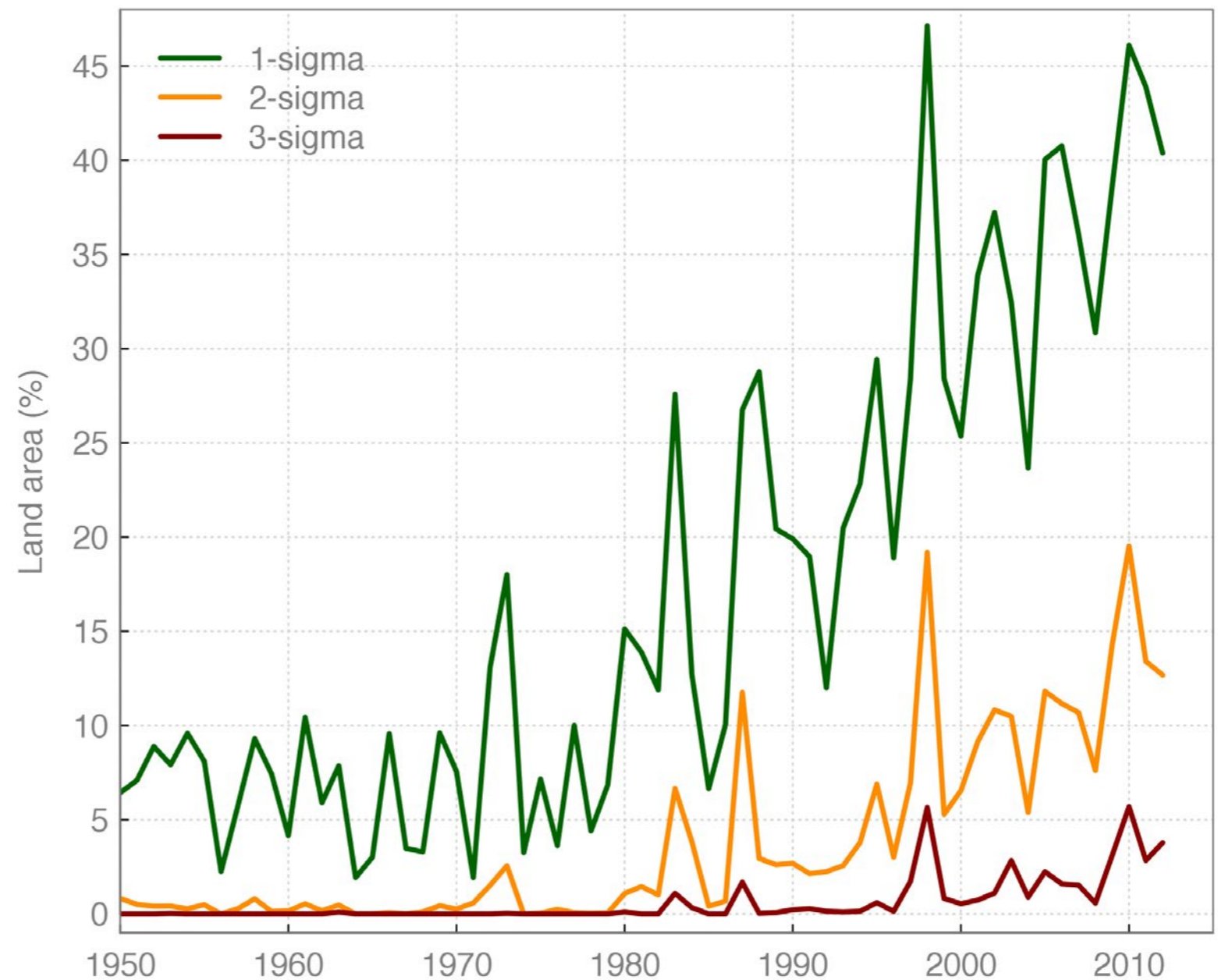
Nach diesen Vorbemerkungen nun ein kurzer Überblick über drei Typen von Extremwetter.

Hitzewellen nehmen stark zu

Am eindeutigsten sieht man die Auswirkungen der globalen Erwärmung bei der Zunahme der Hitzeextreme. Dass es in einem wärmeren Klima mehr Hitzewellen gibt, dürfte wohl auch den Laien nicht überraschen, und die weltweiten Messdaten

Hitzewellen

Anteil der Landfläche unseres Planeten, deren Monatstemperaturen eine, zwei oder drei Standardabweichungen über dem Mittelwert 1951–1980 liegt. Zwei Standardabweichungen entsprechen schon einer seltenen Hitzewelle, drei Standardabweichungen kommen in einem stabilen Klima fast nie vor.



zeigen dies auch sehr klar (siehe Abbildung »Hitzewellen«).

Die Anzahl von Hitzerekorden bei den Monatsmittelwerten liegt heute schon beim Fünffachen der Zahl, die in einem stationären Klima durch Zufall auftreten würde, wie wir in unserem Artikel »Klimarekorde« (Spektrum der Wissenschaft, Februar 2014) näher erläutert haben (4). Derartige Hitzewellen sind für uns Menschen keineswegs harmlos – der »Jahrhundertsommer« 2003 hat in Europa 70 000 Hitzetote gefordert.

Extreme Niederschläge: Ein komplizierterer Fall

Nicht ganz so klar sieht es bei Extremniederschlägen aus. Zwar erwartet man auch hier generell eine Zunahme, weil wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen und dann abregnen kann. Niederschläge sind aber räumlich und zeitlich sehr heterogen. In manchen Gegenden nehmen die mittleren Niederschläge zu, in anderen ab – auch abhängig von der Jahreszeit. Die mittleren Niederschläge können abnehmen, die Extreme dennoch zunehmen – diese beiden Dinge hängen von verschiedenen physikalischen Prozessen ab. Die Fähigkeit von Klimamodellen, regionale Niederschlagsveränderungen – insbesonde-

re am extremen Ende der Skala – korrekt wiederzugeben, sind ziemlich begrenzt. Zum Beispiel, weil einzelne Wolken nicht explizit aufgelöst werden können: Sie sind schlicht zu klein für das Modellgitter.

Signifikante Trends in den Messdaten zu finden wird auch dadurch erschwert, dass die Schwankungen im Vergleich zum erwarteten Trend groß sind, das Verhältnis Signal zu Rauschen also ungünstig. Da hilft es, über möglichst viele Datenreihen zu aggregieren, wie bei der gezeigten weltweiten Analyse der Anzahl von neuen Rekorden bei der Tagessumme der Niederschläge.

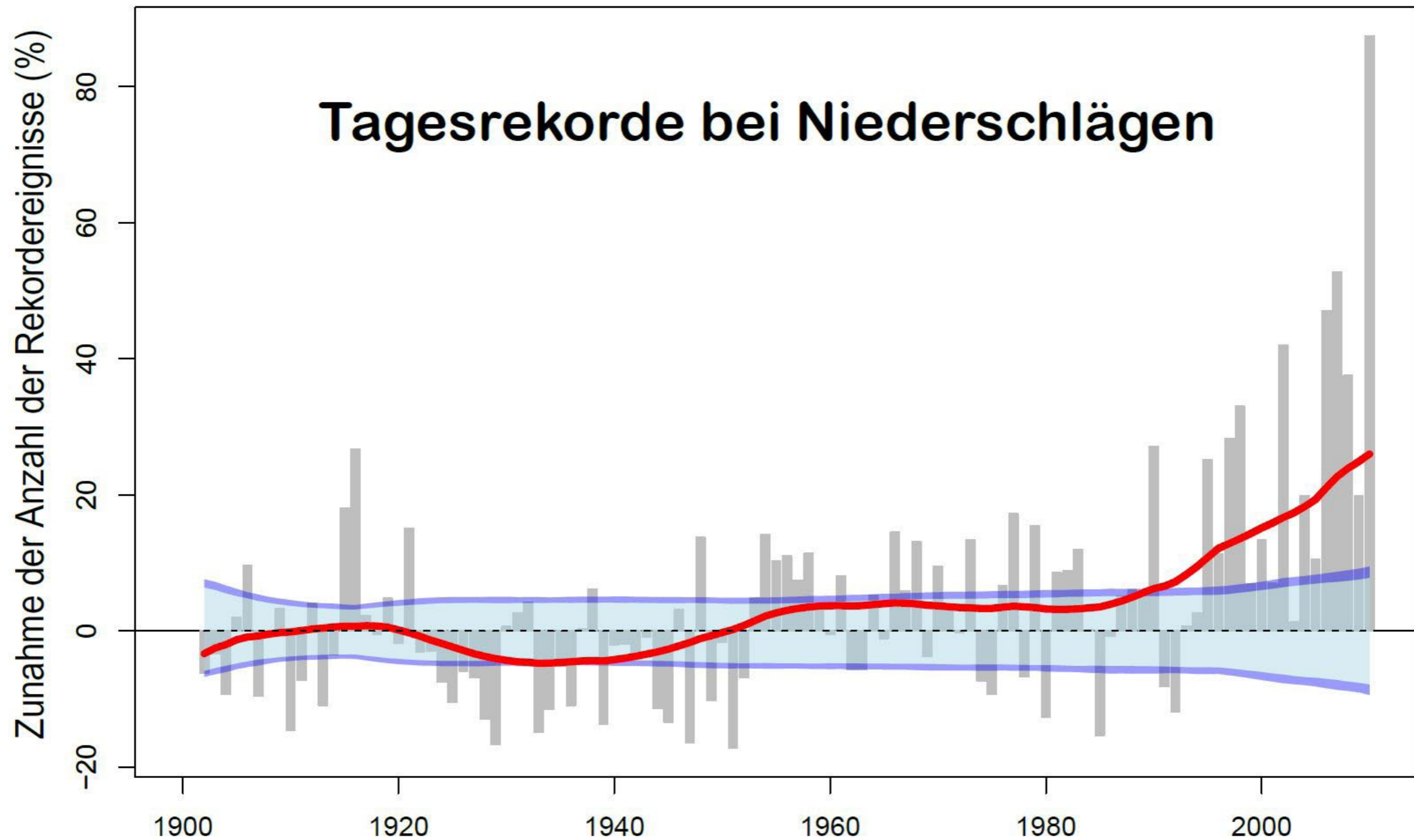
Als Gegenargument wird gerne eine Statistik für Deutschland gezeigt, die die Zahl der Tage mit Niederschlägen über 30 mm zeigt. Hier sind zwei der eingangs erwähnten Dinge relevant. Erstens widerlegen diese Daten keineswegs eine Zunahme, sondern sie *zeigen* eine Zunahme um 8 Prozent seit 1951 – nur dass diese nicht signifikant ist, also auch Zufall sein könnte. Und zweitens sind dies zwar Tage mit Starkregen, aber nicht wirklich extrem – bei den Unwettern im Frühjahr 2016, bei denen unter anderem Braunsbach überschwemmt wurde, gab es Niederschläge von über 100 mm *pro Stunde*. In Berlin fielen im Juni 2017

in 18 Stunden bis zu 150 mm Regen. Über die Veränderungen bei derart extremen Niederschlägen, die schwere Schäden verursachen können, sagt diese Statistik daher kaum etwas aus.

Die Fachzeitschrift »Nature« titelte übrigens zu der gezeigten und einer neueren australischen Studie mit ähnlichen Ergebnissen im März: »Global warming already driving increases in rainfall extremes«. Mehr zum Thema in meinem Blogartikel »Warum die globale Erwärmung mehr Extremregen bringt«.

Tropenstürme: Was Forscher erwarten und was die Messdaten zeigen

Die Energiequelle von Tropenstürmen ist das warme Meerwasser – daher treten sie nur in den Tropen auf und nur im wärmeren Halbjahr, wenn die Wassertemperaturen über 26 Grad Celsius liegen. Daher liegt es nahe, dass Tropenstürme durch die globale Erwärmung stärker werden oder sich auf weitere Regionen verbreiten. Der US-Hurrikan-Experte Kerry Emanuel vom Massachusetts Institute of Technology ist der Vater einer Energiegleichung, die die maximale Stärke eines Tropensturms unter idealen Bedingungen beschreibt – und



Graue Balken zeigen die Anzahl der Tagesrekorde bei den Niederschlagssummen weltweit, relativ zu der Anzahl, die durch Zufall bei unveränderlichem Klima auftreten würde (Zuwachs in Prozent). Im Jahr 2010 lag die Anzahl dieser Rekordregen 88 Prozent höher als ohne Klimawandel zu erwarten wäre. Diese Zahl schwankt von Jahr zu Jahr stark; will man den klimabedingten Trend erfassen, muss man also glätten. Diesen Klimatrend zeigt die rote Linie. In einem stationären Klima sollte die rote Kurve sich innerhalb des blauen Konfidenzintervalls bewegen. Seit 1990 ist der Anstieg signifikant.

diese »potenzielle Intensität« nimmt mit der Meerestemperatur zu. Mit anderen Worten: der »Deckel«, der die Tropensturmstärken nach oben hin begrenzt, wird angehoben.

Nun könnte es natürlich andere Veränderungen im Klimasystem geben, die dem entgegenwirken – zum Beispiel eine Zunahme von Scherwinden, die die Wirbelstürme auseinanderreißen, oder Veränderungen in höheren Luftschichten. Diese Frage wird seit vielen Jahren mit Hilfe von Modellsimulationen erforscht. Die Ergebnisse zahlreicher solcher Studien lassen sich kurz und knapp so zusammenfassen: Durch die globale Erwärmung rechnen wir nicht mit mehr Tropenstürmen insgesamt, wohl aber mit einer zunehmenden Zahl von besonders starken Stürmen der Kategorien 4 und 5, insbesondere auch mit Stürmen von bislang nie beobachteter Stärke. Dieser Sachstand ist spätestens seit dem 4. IPCC-Bericht von 2007 weitgehend Konsens und wurde seither immer wieder bestätigt und erhärtet. So folgte ein aktueller Review-Artikel in »Science« 2016 (6): »Wir erwarten daher, dass die Intensität von Tropenstürmen mit der Erwärmung zunimmt, sowohl im Mittel als auch am

Region	Trend ($\text{m s}^{-1} \text{ decade}^{-1}$)	<i>p</i>
Global	+1	0.1
North Atlantic	+8	<0.01
Eastern North Pacific	no trends	
Western North Pacific	-2	0.03
North Indian	insufficient data	
South Pacific	+2.5	0.09
South Indian	+1.7	0.06

oberen Ende der Skala, so dass die stärksten zukünftigen Stürme die Stärke aller früheren übertreffen werden.«

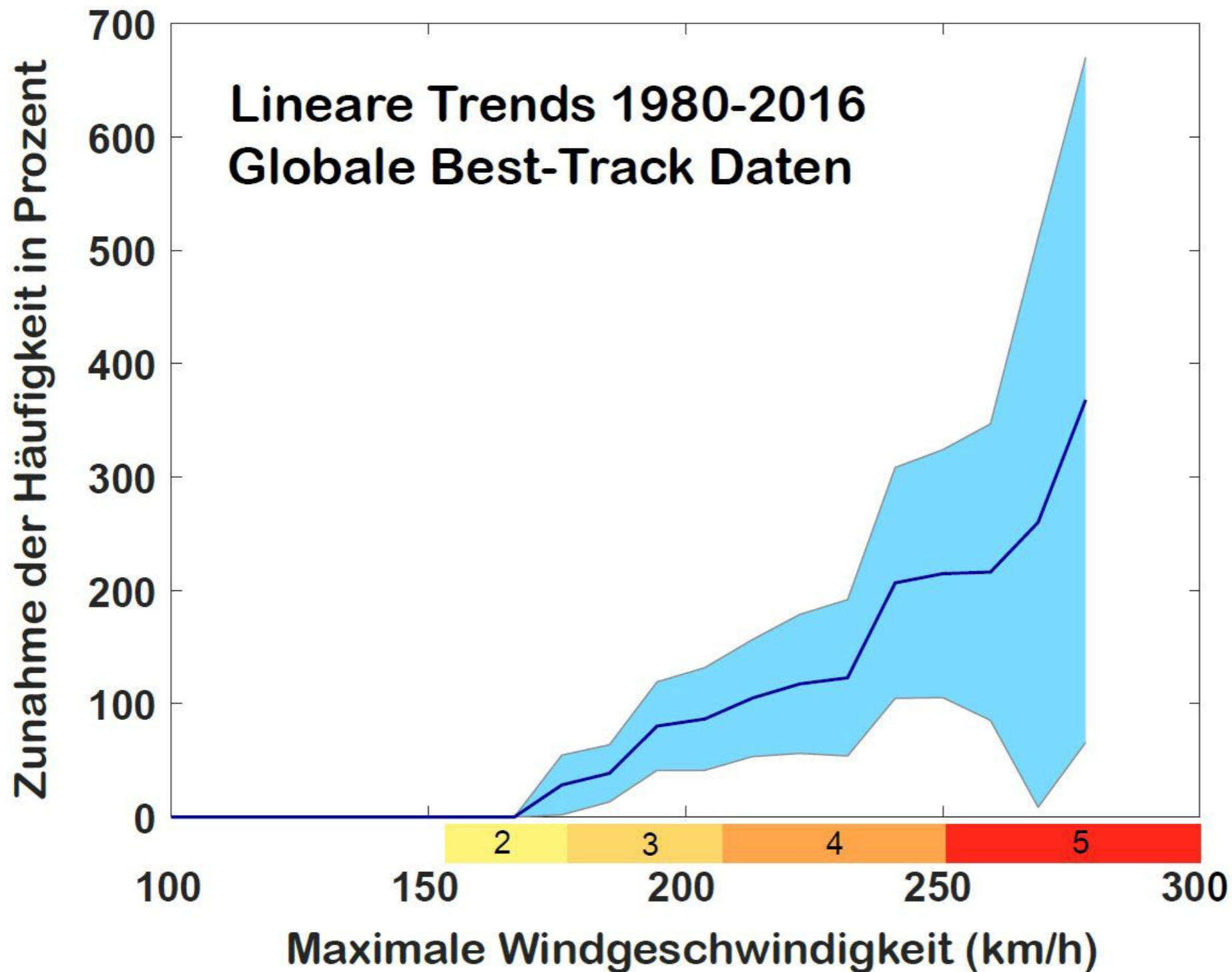
Modelle lassen übrigens auch erwarten, dass die Aerosolver Verschmutzung der Atmosphäre Tropenstürme schwächt und den Effekt der globalen Erwärmung jahrzehntelang kaschiert haben dürfte, was die Entdeckung von Trends in Messdaten weiter erschwert.

Und was zeigen die Messdaten? Es gibt zwei Hauptdatenquellen. Die erste sind die so genannten Best-Track-Daten – es sind die Daten, die die Vorhersagezentren (wie das National Hurricane Center der USA) im operationellen Betrieb über den Pfad und

TRENDANALYSE

Beobachtete lineare Trends 1982–2009 in der Stärke von Hurrikanen (Tropenstürmen mit mindestens 119 km/h Windgeschwindigkeit)

Best-Track-Daten



Prozentuale Zunahme 1980 bis 2016 (als linearer Trend) in der Anzahl von Tropenstürmen weltweit in Abhängigkeit ihrer Stärke. Nur 95 Prozent signifikante Trends sind gezeigt. Die stärksten Stürme nehmen auch am stärksten zu. Rote Farben zeigen die Hurrikan-Kategorie auf der Saffir-Simpson Skala.

die Stärke eines jeden tropischen Wirbelsturms sammeln. Die zweite sind Satellitendaten. Die Best-Track-Daten reichen im Nordatlantik bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück. Sie zeigen seither einen Anstieg in der Zahl von Tropenstürmen sowie der »major hurricanes« (Kategorie 3, 4 und 5) um rund das Dreifache. Allerdings leiden sie unter einem der oben genannten Probleme: Sie sind inhomogen, weil in früheren Zeiten, vor der Satellitenära, eine unbekannte Anzahl von Stürmen draußen auf dem Meer schlicht von niemandem registriert wurde.

Es gibt eine Reihe cleverer Versuche, diesen so genannten »undercount bias« zu korrigieren. Sie reichen von einer moderaten Korrektur, die den ansteigenden Trend weitgehend intakt lässt (7) bis hin zu massiven Korrekturen, durch die der Trend fast beseitigt wird (8). Allerdings spricht einiges dagegen, dass der ansteigende Trend komplett ein Artefakt der Daten ist, zum Beispiel die gute Korrelation mit der Größe der Wasserfläche, die wärmer als 26 Grad Celsius ist (9).

Die zweite Datenquelle sind die Satellitendaten. Diese zeigen eine Zunahme der starken Tropenstürme in den meisten

Meeresbecken. Auch diese Daten sind allerdings nicht homogen, sondern stammen von einer Vielzahl von Satelliten. Die allgemein als sehr sorgfältig anerkannte Homogenisierung dieser Daten durch Kossin et al. 2013 (10) reduziert die Trends etwas, beseitigt sie aber nicht. Die stärkste Zunahme findet man im Nordatlantik, sie ist mehr als 99 Prozent signifikant.

Kerry Emanuel hat kürzlich eine Analyse der linearen Trends in den Best-Track-Daten über 1980–2016 durchgeführt. Eine signifikante globale Zunahme (95 Prozent Signifikanzniveau) findet sich bei allen Stürmen mit maximalen Windgeschwindigkeiten ab 175 Kilometer pro Stunde (in Übereinstimmung mit der Satellitenauswertung von Kossin et al. ist der Trend für alle Hurrikane, also Stürme ab 119 km/h, nicht signifikant). Emanuel argumentiert, dass seit 1980 auf Grund der Existenz der Wettersatelliten keine Stürme übersehen wurden, schon gar keine der stärksten, dass aber die Messungen der Windgeschwindigkeit in den Best-Track-Daten genauer sind als die Bestimmung vom Satelliten aus, unter anderem weil für die ersten Flugzeuge Messungen im Sturm

durchführen. Der Zeitraum ab 1980 ist auch der, in dem drei Viertel der globalen Erwärmung stattfanden.

Zu dieser erstens erwarteten und zweitens beobachteten Zunahme gerade der stärksten Stürme passt die Häufung von Rekorden in den letzten Jahren. Sandy (2012) war der größte je im Atlantik beobachtete Hurrikan. Haiyan (2013) im Pazifik erreichte die höchste Windgeschwindigkeit weltweit, nur um 2015 von Patricia noch übertroffen zu werden (11). Pam (2015) war der stärkste je im Südpazifik beobachtete Sturm, doch schon 2016 wurde ihm dieser Titel durch Winston wieder genommen. Der stärkste Sturm im südindischen Ozean war Fantala (2016). Ophelia (2017) war der erste Sturm der Kategorie 3, der je so weit nordöstlich im Atlantik auftrat – zum Glück drehte er vor Portugal entgegen erster Vorhersagen nach Norden ab, er erreichte dann abgeschwächt Irland. Der September 2017 brach den Rekord für kumulierte Hurrikanenergie im Atlantik. Irma (2017) hielt dort länger als je ein Sturm zuvor Windgeschwindigkeiten von 300 km/h durch (für 37 Stunden – der bisherige Rekord war 24 Stunden durch Haiyan 2013). Alles Zufall?

Viele Schäden durch Tropenstürme ent-

stehen nicht direkt durch den Wind, sondern durch Wasser: Regen von oben, Sturmflut vom Meer. Harvey brachte die größten Regenmengen der US-Geschichte – die Wahrscheinlichkeit für ein solches Regenereignis hat sich durch die Klimaerwärmung in den letzten Jahrzehnten um ein Mehrfaches erhöht (12), nicht zuletzt auf Grund der globalen Erwärmung steigt der Meeresspiegel und erhöht die Sturmfluten. Eine neue Studie (13) zeigt zum Beispiel, dass sich die Wiederkehrzeit einer bestimmten Sturmfluthöhe in New York City von heute 25 Jahre innerhalb der nächsten drei Jahrzehnte auf 5 Jahre verkürzen wird. In New York wird daher intensiv über Sturmflutbarrieren diskutiert (14).

Fazit

Als Klimaforscher stehen wir in der Pflicht, konkrete, sachliche Auskünfte über die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Wetterextremen zu geben, die in der begutachteten wissenschaftlichen Fachliteratur nachvollziehbar belegt sind und deren Sachstand insgesamt realistisch wiedergeben. Der Sachstand dieser Forschung besagt: Mit Sicherheit führt die anthropogene globale Erwärmung zu mehr Hitze-

wellen, und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch zu mehr Extremregen und zu einer Zunahme der Anzahl und Intensität der stärksten Tropenstürme. Ähnlich sieht es zum Beispiel bei Dürren und Waldbränden aus, die ich hier nicht weiter diskutieren konnte. Diese Zusammenhänge mögen für manche unbequem sein. Den Kopf in den Sand stecken sollten wir angesichts des damit verbundenen menschlichen Leids und der Zukunftsrisiken jedoch nicht. Obamas Klimaberater John Holdren pflegte zu sagen, dass uns angesichts der globalen Erwärmung drei Dinge zur Wahl stehen: die Erwärmung begrenzen, uns an sie anpassen oder leiden. Ich bin dafür, die ersten beiden entschlossen anzupacken, um das Dritte zu minimieren. ↩

(Spektrum.de, 20.11.2017)

(1) Coumou D & Rahmstorf S (2012) *Nature Clim. Change* 2(7):491-496.

(2) Stadtherr L, Coumou D, Petoukhov V, Rahmstorf S, & Petri S (2016) *Science Advances* 2:e1501428.

(3) Coumou D & Robinson A (2013) *Environmental Research Letters* 8(3): 034018.

(4) Coumou D, Robinson A, & Rahmstorf S (2013) *Clim. Change* 118(3-4):771-782.

(5) Lehmann J, Coumou D, & Frieler K (2015) *Clim. Change*

132(4):501-515.

(6) Sobel A, et al. (2016) *Science* 353:242-246.

(7) Mann, M. E., T. A. Sabbatelli and U. Neu (2007) *Geophysical Research Letters* 34(22).

(8) Vecchi GA & Knutson TR (2008) *J. Clim.* 21(14):3580-3600.

(9) Benestad RE (2009) *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(2):635-645.

(10) Kossin JP, Olander TL, & Knapp KR (2013) *J. Clim.* 26(24):9960-9976.

(11) Velden C, Olander T, Herndon D, & Kossin JP (2017) *Mon. Weather Rev.* 145(3):971-983.

(12) Emanuel K (2017) *Proc Natl Acad Sci USA* 10.1073/pnas.1716222114.

(13) Garner A, et al. (2017) *Proc Natl Acad Sci USA* 114(45):11861-11866.

(14) Rahmstorf S (2017) *Proc Natl Acad Sci USA* 114(45):11806-11808.