

STATISTIK

Klimarekorde

Ob eine einzelne ungewöhnliche Hitzewelle Folge des Klimawandels ist, lässt sich nicht mit Sicherheit beantworten. Aber dass sich derartige Extremereignisse in letzter Zeit häufen, kann man – mit Hilfe mathematischer Modelle – sehr wohl auf den allgemeinen Erwärmungstrend zurückführen.

Von Gregor Wergen, Joachim Krug und Stefan Rahmstorf

Am letzten Juliwochenende 2013 war die ganze Titelseite der »Welt« von einer großen Deutschlandkarte in Orange- und Rottönen ausgefüllt. Als Schlagzeile dazu stand nur ein einziges Wort: »Heiß!« Und tatsächlich maßen Meteorologen am 27. Juli an mehreren Orten in Süddeutschland, darunter Konstanz am Bodensee, die höchsten Temperaturen seit Beginn der Wetteraufzeichnungen.

Dabei waren die Bilder von überfluteten Ortschaften und gebrochenen Dämmen aus dem Mai und Juni noch frisch im Gedächtnis: Etliche Bäche und Flüsse in Mitteleuropa waren über die Ufer getreten, hatten große Gebiete überflutet und Schäden in Milliardenhöhe angerichtet. Vor allem an den Zuflüssen von Donau und Elbe maß man Pegelstände, die seit mindestens 100 Jahren noch nie erreicht worden waren – und das, obgleich schon die Überschwemmungen von 2002 und 2005 so gewaltig waren, dass sie zu Recht als »Jahrhunderthochwasser« galten.

Warum gibt es so viele neue Klimarekorde? Müssen wir in Zukunft mit immer mehr Jahrhundertstürmen, Rekordfluten oder heißesten Sommern aller Zeiten rechnen? Und vor

allem: Wie verändert der Klimawandel die Häufigkeit von Wärme- und Kältereorden? Was können wir umgekehrt aus diesen Ergebnissen für den Klimawandel lernen? Antworten auf diese Fragen gibt die mathematische Theorie der Rekorde – mit oftmals verblüffenden Ergebnissen.

Zusammenspiel von chaotischen Schwankungen und gesetzmäßigen Entwicklungen

Das Klimasystem lässt sich am besten als eine Mischung aus kurz- und langfristigen Prozessen beschreiben. Dabei werden Schwankungen über Tage und Wochen (»Wetter«) stark vom Zufall oder Chaos bestimmt, während für die Entwicklungen über Jahre und Jahrzehnte hinweg (»Klima«) allgemeine Gesetze wie der Satz von der Energieerhaltung eine vorrangige Rolle spielen. Was uns deren Zusammenspiel über Rekorde sagt, lässt sich am Beispiel der mittleren globalen Temperatur demonstrieren (Kasten S. 82). Man sieht sofort, dass in den letzten Jahrzehnten viele Wärmerekorde aufgetreten sind, weil der langfristige Trend aufwärtsgeht; dafür gab es seit 1910 keinen Kältereorden mehr.

Dagegen ähneln die gleichen Daten, wenn man den Trend abzieht, reinen Zufallswerten. Tatsächlich lässt sich auf den ersten Blick keine signifikante Abweichung von einer gaußschen Normalverteilung feststellen. Allerdings sind diese Ereignisse nicht wirklich zufällig in dem Sinn, dass jegliche Ursachenforschung zwecklos wäre. So hängt der Wärmereorden im Jahr 1998 damit zusammen, dass damals das stärkste bis dahin bekannte El-Niño-Ereignis im tropischen Pazifik stattfand. Die natürliche, zufällige Schwankung zwischen El Niño und seiner kühlen Schwester La Niña korreliert mit der globalen Mitteltemperatur: El Niño bringt besonders warme Temperaturen.

Auch Sonnenzyklen spielen eine Rolle, allerdings nur eine sehr schwache. Die Wärmereorden 2005 und 2010 kamen

AUF EINEN BLICK

MATHEMATISCHE THEORIE DER REKORDE

1 Extremereignisse bieten einen wertvollen Einblick in komplexe Systeme wie das **Klima der Erde** oder auch die **globalen Finanzmärkte**.

2 **Mit Hilfe mathematischer Modelle** lässt sich die zunehmende Anzahl der Hitzereorden auf einen allgemeinen Erwärmungstrend zurückführen.

3 Für Rekordstürme und -niederschläge ist ein solcher Zusammenhang bislang **nicht statistisch belegbar**.



Das Jahrhunderthochwasser vom August 2002 trug seinen Namen zu Recht, denn ein Ereignis dieses Ausmaßes war seit 1845 nicht vorgekommen. In Dresden trat die Weißeritz, ein Nebenfluss der Elbe, so rasch über die Ufer, dass die Deutsche Bahn ihre Züge aus dem Hauptbahnhof nicht mehr rechtzeitig ins Trockene bringen konnte.

PICTURE ALLIANCE / AP PHOTO / MATTHIAS RIETSCHEL

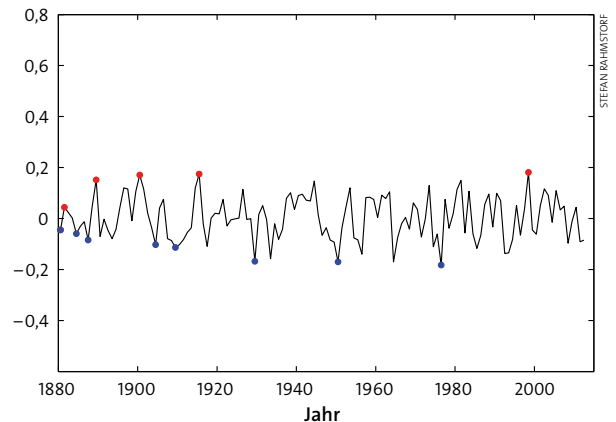
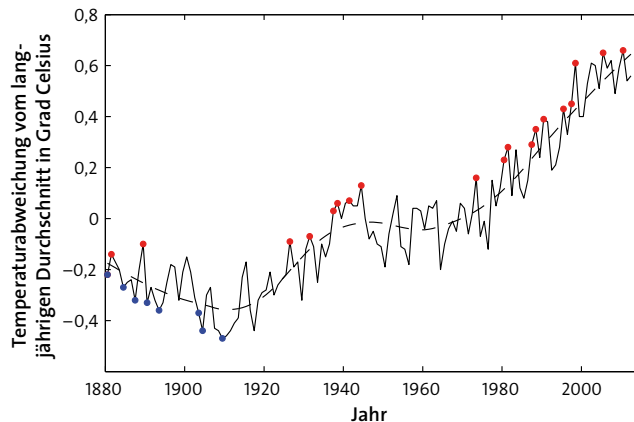
Langjährige Trends und kurzfristige Schwankungen

Die über das Jahr gemittelte Temperatur an der Erdoberfläche schwankt im Zehntelgradbereich; zugleich ist sie seit 1910 »im Durchschnitt« um etwa ein Grad angestiegen.

Mit einem Verfahren namens LOESS kann man kurz- und langfristige Effekte voneinander trennen, ohne theoretische Annahmen über sie voraussetzen zu müssen: Man ersetzt jeden Messwert durch ein »gewichtetes Mittel«, in dem der Messwert selbst am stärksten und seine Nachbarn mit zuneh-

mender Entfernung immer weniger berücksichtigt werden. Die so geglätteten Werte sind im linken Bild gestrichelt eingezeichnet. Das rechte Bild zeigt die Differenz von gemessenen und geglätteten Werten.

Unter den gemessenen Werten dominieren die Hitzerekorde (rote Punkte) über die Kälterekorde (blaue Punkte); dagegen stehen sie in den um den langfristigen Trend bereinigten Daten (rechtes Bild) in einem ausgewogenen Verhältnis.



trotz kalter Sonne zu Stande: Just von 2005 bis 2010 war die Sonneneinstrahlung geringer als je zuvor seit Beginn der Satellitenmessungen in den 1970er Jahren.

Immerhin zeigt die um den Trend bereinigte Datenreihe in Bezug auf Rekorde das Verhalten einer echten Zufallsreihe: Hitze- und Kälterekorde sind einigermaßen gleich häufig, und ihre Anzahl ist anfangs am größten und nimmt dann stark ab. In wirklich zufälligen Daten beträgt die Wahrscheinlichkeit eines neuen (Wärme-)Rekords $1/n$, wobei n die Anzahl der bisherigen Datenpunkte ist (Kasten S. 84). Das leuchtet ein: Gab es bis dato 43 Messwerte, dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass der letzte der wärmste ist, $1/43$. Dazu müssen die Werte nicht einmal normalverteilt sein. Es genügt, dass die statistische Verteilung zu jedem Zeitpunkt die gleiche und unabhängig von allen anderen Zeitpunkten ist.

Das macht – neben anderen Dingen – die Untersuchung von Rekorden so attraktiv: Unter unveränderten Bedingungen, also in einem stationären Klima, ist ihre erwartete Häufigkeit bekannt. Wie ändert sich diese durch den Klimawandel?

Extreme gibt es auch zufällig

Bevor wir dem weiter nachgehen, wollen wir ein gängiges Missverständnis ausräumen. Nach einem Extremereignis werden wir häufig gefragt: »War der Klimawandel die Ursache?« Auf diese Frage gibt es keine sichere Antwort. Selbst wenn es in früheren Zeiten schon einmal einen ähnlichen Sturm, ein noch höheres Hochwasser oder eine schlimme Hitzewelle gab, belegt das nicht, dass die globale Erwärmung an dem aktuellen Extremereignis unbeteiligt war. Umgekehrt muss ein bislang nie erlebtes Extremereignis nicht unbedingt durch die globale Erwärmung verursacht worden sein. Denn auch ohne Klimawandel gibt es durch reinen Zufall immer wieder neue Rekorde. Sinnvoll ist allein die Frage, wie der Klimawandel die Häufigkeit bestimmter Extremereignisse – und damit auch die Wahrscheinlichkeit für neue Rekorde – verändert.

Der globale Temperaturmittelwert ist in den letzten 40 Jahren nahezu linear und mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,16 Grad pro Jahrzehnt angestiegen. An diesem Trend haben auch die etwas kühleren Jahre 2008, 2011 und 2012 nichts geändert. Mit Methoden aus der Wahrscheinlichkeitstheorie lässt sich berechnen, welchen Einfluss ein derartiger

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

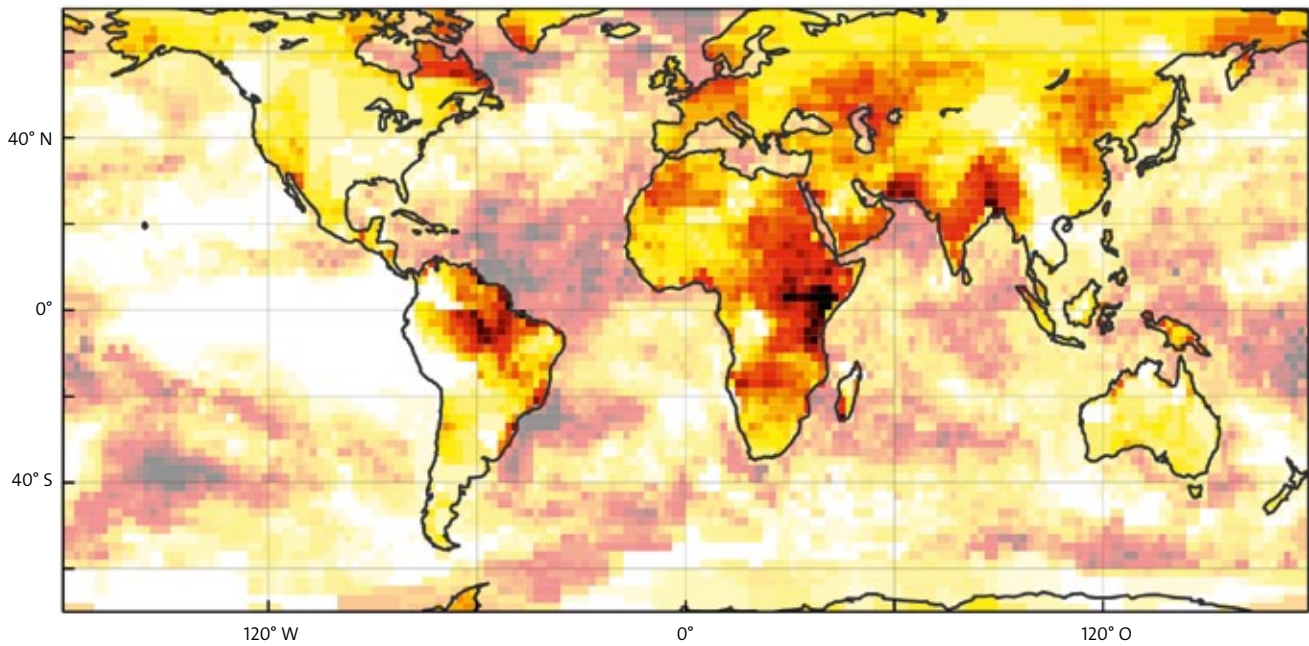


ISTOCKPHOTO / SEAN MARTIN

Unser Online-Dossier zum Thema »Klimawandel« finden Sie unter

www.spektrum.de/thema/klimawandel/721331





Klimarekorde werden häufiger – aber nicht gleichmäßig über die Erde verteilt. Für jede der durch kleine Quadrate gekennzeichneten Regionen wurde ausgezählt, wie oft im Zeitraum von 2001 bis 2010 die über einen Monat gemittelte Temperatur einen Rekord aufstellte, das heißt höher lag als alle entsprechenden Werte für den-

selben Kalendermonat seit 1880. Die Farbkodes zeigen, um welchen Faktor die so ermittelte Zahl der Rekorde die Erwartung für ein unverändertes Klima ($1/n$ -Gesetz) übertrifft: im globalen Mittel um das Fünffache, in einigen Regionen um das 20-Fache. Über den Ozeanen sind die Farben blasser gewählt, damit die Verhältnisse an Land klarer hervortreten.

Anstieg auf die Häufigkeit von Rekorden haben sollte. Wenn die Daten durch Zufallszahlen mit einer gaußschen Normalverteilung bestimmt sind, die ihrerseits eine gewisse konstante Breite («Standardabweichung») σ hat und deren Mittelwert langsam mit einer Geschwindigkeit c pro Zeitschritt ansteigt, dann beträgt die Rekordwahrscheinlichkeit näherungsweise $P(n) \approx 1/n + (c/\sigma)f(n)$, wobei die Funktion $f(n)$ nur schwach von n abhängt (Kasten S. 84).

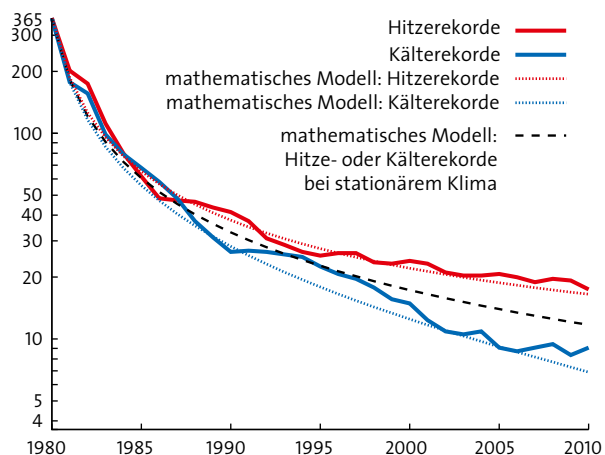
Entscheidend ist also das Verhältnis von Trend zu Standardabweichung. Mit diesem einfachen Resultat lässt sich der Einfluss des Klimawandels auf die Häufigkeit neuer

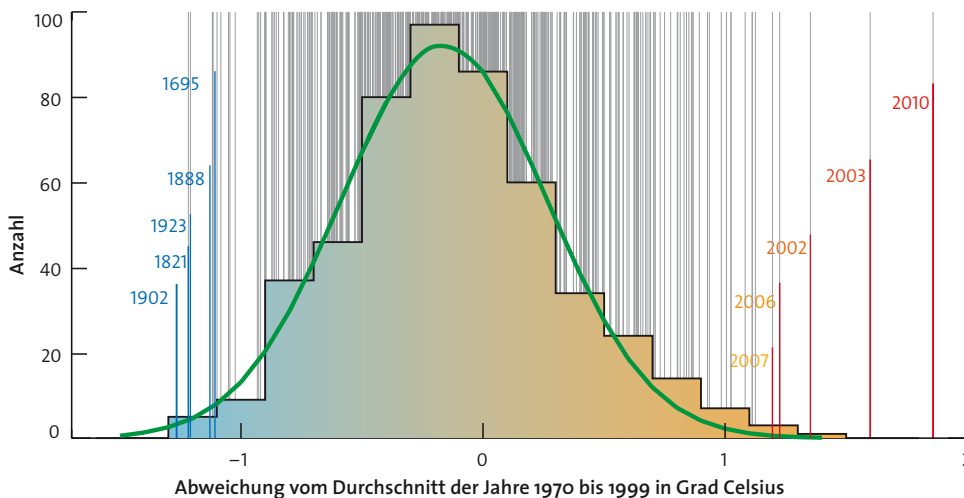
Hitze- und Kälterekorde recht genau beschreiben. So ergibt sich für die globale Temperatur, deren Standardabweichung mit 0,09 Grad sehr klein ist, dass im Mittel jedes vierte Jahr einen neuen Wärmerekord setzen sollte. Tatsächlich finden wir in den letzten 40 Jahren elf Rekordjahre – zuletzt 2005 und 2010.

Dagegen schwanken Tagesmessungen an einzelnen Wetterstationen um ein Vielfaches mehr als die globale Mitteltemperatur, der Erwärmungstrend ist aber ähnlich groß. Daher gibt es bei Tageswerten vergleichsweise weniger Rekorde. Wir haben für die 30 Jahre von 1980 bis 2010 die

Rekorde auf Tagesbasis

Für jede von über 200 europäischen Wetterstationen wurde ein Hitzerekord notiert, wenn die Maximaltemperatur eines Tages höher war als alle seit 1980 am selben Platz und am selben Kalendertag gemessenen Temperaturen; entsprechend zählte man Kälterekorde. Die dicken Linien zeigen für jedes Jahr die über alle Wetterstationen gemittelte Anzahl dieser Ereignisse. Die Vorhersagen des im Kasten auf S. 84 beschriebenen mathematischen Modells (dünne Linien) stimmen gut mit den Messungen überein. Die schwarze gestrichelte Kurve zeigt die Rekordhäufigkeit, die man in einem Klima ohne globale Erwärmung erwartet hätte, also $P(n)=1/n$.





Sommertemperaturen in Europa von 1500 bis 2010. Das Histogramm zeigt an, wie oft die Temperatur in jedes Intervall der Breite 0,2 Grad fiel; grün eingezeichnet ist die Gaußkurve, die am besten zu den Daten passt. Die Jahreszahlen der fünf kältesten und der fünf wärmsten Sommer sind angegeben (Balkenlänge hat keine Bedeutung).

Tageshöchstwerte von 200 europäischen Wetterstationen analysiert und dann gleiche Kalendertage miteinander verglichen, also immer dann einen Rekord notiert, wenn zum Beispiel der wärmste 2. Mai oder der kälteste 30. November seit 1980 zu verzeichnen war. Somit gibt es 365 »Rekordchancen« pro Jahr. Auf diese Weise registrieren wir als Wärmerekord auch ein Ereignis wie eine Tagestemperatur von 20,7 Grad an einem 24. Dezember (wie in München 2012), das in der Mittelung über ein ganzes Jahr schlicht untergegangen wäre.

In einem stationären Klima hätten auch bei dieser Art der Auswertung Hitzerekorde ungefähr so oft vorkommen müssen wie Kältererekorde. Tatsächlich waren es aber deutlich mehr, in den Jahren 2005 bis 2010 sogar doppelt so viele (Kasten S. 83 unten): Über das gesamte Jahr 2010 gab es statt der unter stationären Bedingungen zu erwartenden je 12 Rekorde 17 Hitze- und nur 9 Kältererekorde. Die einfache mathe-

matische Näherungsformel beschreibt die beiden Messkurven sehr gut, liefert also eine brauchbare Vorhersage für die Rekordhäufigkeit in einem sich erwärmenden Klima. Mit Hilfe der zugehörigen Formel kann man sogar die Zufalls- und die Erwärmungseffekte voneinander trennen. Demnach gehen etwa 30 bis 40 Prozent der Tages-Hitzerekorde in den Jahren 2005 bis 2010 auf das Konto des Klimawandels, zumindest bei der Betrachtung ab 1980. Würde man weiter in die Vergangenheit zurückschauen, wären es noch mehr.

Starkregen und Stürme

Da es, wie erwähnt, auf das Verhältnis c/σ ankommt, wächst die Zahl der Rekorde nicht nur umso mehr, je stärker der Temperaturmittelwert ansteigt, sondern auch je kleiner die Standardabweichung der Messungen ist. Deswegen waren in den letzten Jahren nahe den Küsten oder auf Inseln deutlich mehr neue Hitzerekorde zu verzeichnen als an Stationen im

Rekordwahrscheinlichkeiten – mit und ohne Klimaerwärmung

In einer Zeitreihe aus n Zufallszahlen, die alle aus der gleichen (kontinuierlichen) Wahrscheinlichkeitsverteilung gezogen werden, ist die Wahrscheinlichkeit für einen Rekord zum Zeitpunkt n gegeben durch $P(n) = 1/n$. Die zu erwartende Zahl $R(n)$ der Rekorde bis zur Zeit n ergibt sich aus der Summe über diese Wahrscheinlichkeiten:

$$R(n) = P(1) + P(2) + \dots + P(n) = 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}$$

Diese Summe (die »harmonische Reihe«) wächst für große Zeiten n logarithmisch an: $R(n) \approx \ln(n) + 0,577\dots$ (ln ist der Logarithmus zur Basis e , der »natürliche Logarithmus«).

Die Wahrscheinlichkeit für einen neuen Rekord wird zwar immer geringer – nach 1000 Zeitschritten ist sie nur noch 1/1000 oder 0,1 Prozent –, aber nie null.

Zur Modellierung von Rekorden in einem sich erwärmenden Klima verwendet man normalverteilte Zufallszahlen mit

konstanter Standardabweichung σ und zeitabhängigem Mittelwert $\mu(t) = \mu(0) + ct$. Dabei ist c die konstante jährliche Zunahme des Temperaturmittelwertes. Bei einer derartigen Zeitreihe ergibt sich für die Rekordwahrscheinlichkeit zur Zeit (im Jahr) n die Näherungsformel

$$P(n) \approx \frac{1}{n} + \frac{c}{\sigma} \frac{2\sqrt{\pi}}{e^2} \sqrt{\ln\left(\frac{n^2}{8\pi}\right)} = \frac{1}{n} + \frac{c}{\sigma} f(n),$$

wobei die Funktion $f(n)$ nur schwach von n abhängt. (Für $n=30$ ist $f(n) \approx 0,91$ und für $n=100$ auch nur 1,17.) Ein Mittelwertzuwachs (Trend) der Größe c lässt also die Rekordwahrscheinlichkeit im Wesentlichen proportional zu c/σ anwachsen. In Europa galt für 1980 bis 2010 $c \approx 0,045$ Grad/Jahr (der globale Trend ist wegen der ausgleichenden Wirkung der Ozeane geringer). Für die Tageshöchstwerte (Kasten S. 83) findet man die Standardabweichung $\sigma \approx 3,3$ Grad, daraus ergibt sich $c/\sigma \approx 0,014$ /Jahr.

Auf und Ab an der Börse

Während Datenreihen aus lokalen oder globalen Temperaturen recht gut als Summe aus einem deterministischen Trend und voneinander unabhängigen Zufallsereignissen beschreibbar sind, ist ein derartiges Modell für andere Bereiche nicht angemessen. Das klassische Gegenbeispiel ist die Börse. Dort spielt der Zufall zwar eine große Rolle, und Rekorde wie der höchste Aktienkurs oder DAX-Wert aller Zeiten erregen stets große Aufmerksamkeit. Aber die Vorstellung, der heutige Kurs sei – bis auf einen allgemeinen Trend – unabhängig vom gestrigen, passt nicht zur Realität. Stattdessen modelliert man derartige Preisbewegungen durch einen so genannten »Random Walk« (»Irrfahrt«): Nicht der Kurs selbst, sondern die Differenz (oder das Verhältnis) zwischen dem aktuellen und dem letzten Kurs ist eine Zufallsgröße, die von ihresgleichen unabhängig ist.

Genauer: Der Ort $X(n)$ einer Irrfahrt zur Zeit n ergibt sich als Summe des Ortes zum Zeitpunkt $n-1$ und einer normalverteilten Zufallszahl $g(n)$:

$$X(n) = X(n-1) + g(n)$$

Eine solche Irrfahrt ist symmetrisch, das heißt, Preissprünge nach oben und nach unten sind gleich wahrscheinlich und im Mittel gleich hoch.

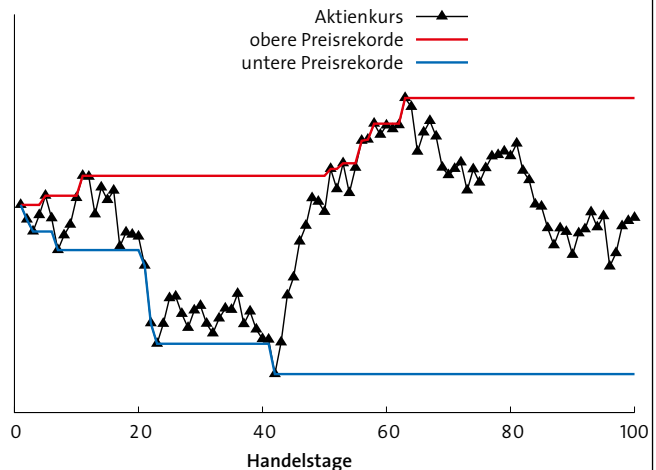
Irrfahrten dienen als Modell für zahlreiche zufallsabhängige Prozesse, allen voran die brownische Molekularbewegung: Das Teilchen, dessen Zappelbewegung man unter dem Mikroskop beobachtet, ist zufälligen Stößen ausgesetzt, die voneinander unabhängig sind und alle derselben Normalverteilung folgen – so die Modellvorstellung, die über einen mathematischen Grenzwertprozess zu einer Theorie der Diffusion führt. Eines der wichtigsten Ergebnisse: Wegen der chaotischen Bewegung ist die Entfernung eines Teilchens vom Ursprungsort nicht proportional der Anzahl der Stöße, die es inzwischen erhalten hat, sondern nur der Wurzel aus dieser Anzahl.

Diese Abhängigkeit findet sich bemerkenswerterweise in der Statistik der Rekorde wieder: Für die Rekordwahrscheinlichkeit $P(n)$ und die mittlere Rekordzahl $R(n)$ einer symmetrischen Irrfahrt haben Satya Majumdar und Robert Ziff 2008 die Näherungsformeln

$$P(n) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi n}} \quad \text{und} \quad R(n) \approx \frac{2\sqrt{n}}{\sqrt{\pi}}$$

angegeben (*Physical Review Letters* 101, 050601). $P(n)$ fällt also nicht proportional zum Kehrwert von n ab, sondern nur zu dessen Wurzel. Nach 1000 Zeitschritten erwartet man somit in einem Random Walk im Mittel etwa $R(1000)=35,7$ Rekorde. In genauso vielen unabhängigen Zufallszahlen (ohne Trend) gibt es dagegen nur etwa 7,5 Rekorde.

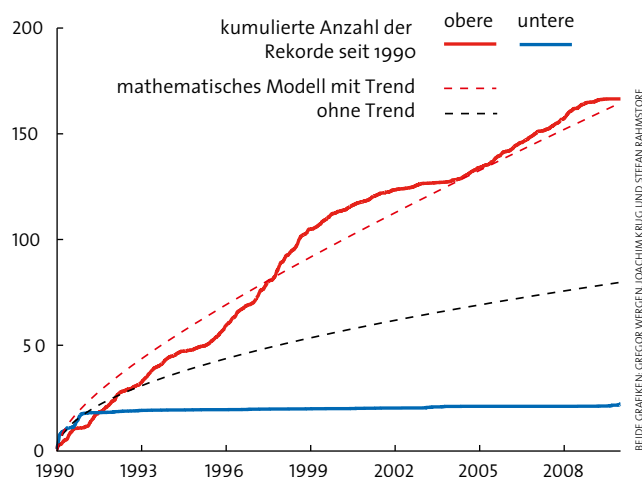
Ähnlich wie beim Klimawandel führt auch hier der langfristige Anstieg der Kurse (zumindest bei denjenigen Firmen, die am Markt bleiben) zu einem deutlichen Überschuss von positiven Rekorden.



Kurs einer fiktiven Aktie, bei der alle Kursdifferenzen zum jeweiligen Vortag voneinander unabhängig sind und derselben Gauß-Verteilung folgen.

Für die unten stehende Grafik haben wir die 366 Aktien analysiert, die von 1990 bis 2009 durchgängig im amerikanischen Index Standard & Poors 500 vertreten waren (www.arxiv.org/abs/1307.2048). Für jede von ihnen haben wir ausgezählt, wie oft sie seit Anfang 1990 ihren bisherigen Höchststand übertroffen hat beziehungsweise unter ihren bisherigen Tiefststand gesunken ist. Die durchgezogenen Linien zeigen die über alle Aktien gemittelte Anzahl dieser Rekorde, die gestrichelten die Vorhersage eines mathematischen Modells für Random Walks. Die Vorhersage mit Trend entstammt einem etwas komplizierteren (hier nicht beschriebenen) Modell. Es fällt auf, dass es seit etwa 1992 kaum untere Rekorde gegeben hat.

Anders als beim Klimawandel ist auf dem Aktienmarkt der Trend selbst großen Schwankungen unterworfen. Insbesondere kann er zum Beispiel in Zeiten von Finanzkrisen stark negative Werte annehmen, was die Analyse von Rekordereignissen deutlich komplizierter macht.





FOTOLIA / OLESYDRACHENKO

Bis zum nächsten Jahrhunderthochwasser verging dann nur ein gutes Jahrzehnt: Im Sommer 2013 stand die Dresdner Innenstadt (hier in der Nähe der Semperoper) schon wieder unter Wasser.

Binnenland. Die Meere wirken wegen ihrer hohen Wärmekapazität ausgleichend, weshalb die Temperaturen dort weniger um ihren Mittelwert schwanken – die Standardabweichung ist geringer.

Mittelwerte über Monate oder Jahreszeiten an einzelnen Orten schwanken deutlich weniger als Tageswerte; ihre Standardabweichung liegt zwischen den Werten für einzelne Tage und denen für ganze Jahre. Im Zeitraum 2001 bis 2010 gab es weltweit die fünffache Anzahl der Monatshitzerekorde, die man in einem stationären Klima erwarten würde (Bild S. 83 oben). Von fünf Rekorde wäre also nur einer auch ohne globale Erwärmung aufgetreten. Anders ausgedrückt: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Rekord durch die Erwärmung verursacht wurde, liegt bei 80 Prozent.

Schlimmer als einzelne heiße Tage sind wochenlang anhaltende Hitzewellen mit ihren oft verheerenden Folgen für Mensch und Natur. Sie gehen mit Dürren und Waldbränden einher wie der Rekordjuli 2010 (Bild S. 84 oben) im westlichen Russland, in dessen Folge die russische Regierung Getreideexporte verbot. Der »Jahrhundertssommer« 2003 im westlichen Europa verursachte rund 70000 Hitzetote und ebenfalls massive Ernteverluste.

Wie steht es nun mit Niederschlägen, Stürmen und Hochwassern? Es ist deutlich schwieriger, einen Einfluss der globalen Erwärmung auf deren Häufigkeit nachzuweisen. Die Daten schwanken erheblich stärker als bei Temperaturen, die Werte sind alles andere als normalverteilt, und es gibt große



regionale Unterschiede. Bei der Temperatur geht der Trend fast überall auf der Welt nach oben, die Niederschlagsmengen jedoch nehmen an manchen Orten ab und andernorts zu – oder werden sogar an ein und demselben Ort im Sommer weniger und im Winter mehr. Es verändern sich nicht so sehr die Gesamtmengen wie die räumlichen und zeitlichen Muster der Niederschläge. Obendrein sind die Messfehler größer als bei den Temperaturen. Aus einer Analyse, die wir nach demselben Verfahren wie für die Rekordtemperaturen durchgeführt haben, geht nicht hervor, dass Rekorde der Tagesniederschlagsmenge signifikant häufiger geworden wären. Dies ist jedoch aus den eben genannten Gründen auch nicht unbedingt zu erwarten.

Seit Beginn der Satellitenmessungen 1980 sind die stärksten Tropenstürme noch heftiger geworden – der größte Teil der Stürme dagegen nicht. Es sind aber oft gerade die wenigen besonders extremen Ereignisse, die den größten Schaden für Menschen anrichten. Doch je seltener ein Ereignis, desto weniger lassen sich statistisch gesicherte Aussagen darüber machen.

Veränderungen der globalen Luftströmung

Zu den Rekordhochwassern in den Jahren 2002, 2005 und 2013 haben möglicherweise systematische Veränderungen des Klimas beigetragen. Das ist zwar statistisch nicht belegbar, allerdings sprechen physikalische Argumente dafür. Aus wärmeren Meeren verdunstet mehr Wasser, und wärmere Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen. Das Reservoir, aus dem der Regen von Himmel fällt, wird also in der Tendenz größer und besser gefüllt; da verwundert es nicht, dass die Entleerungen heftiger ausfallen. Zusätzlich verteilt sich wegen der Begradigung der Flussläufe das Wasser nicht mehr in den Flussauen, sondern fließt schneller zu Tal und richtet dort größere Schäden an. Der genaue Zusammenhang zwischen globaler Erwärmung und dem Auftreten von Rekordfluten und -stürmen ist bis heute nicht gut verstanden und muss weiter erforscht werden.

Darüber hinaus diskutieren die Klimaforscher seit einigen Jahren verstärkt darüber, wie die Klimaerwärmung die globalen Luftströmungen beeinflusst und dadurch indirekt Extremereignisse auslöst. Möglicherweise verändert der galoppierende Eisschwund in der Arktis den polaren Jetstream und die großräumigen Luftbewegungen (»planetare Wellen«) in der Atmosphäre. Das könnte erklären, warum die Hitze-

welle in Russland im Sommer 2010 so katastrophale Ausmaße annahm – und zur gleichen Zeit Pakistan von den schlimmsten Überschwemmungen seiner Geschichte heimgesucht wurde. Eine solche Suche nach den physikalischen Mechanismen geht weit über die einfache statistische Betrachtung der Rekordhäufigkeit hinaus.

Wie wird es weitergehen mit den Hitzerekorden? Unser Modell macht eine klare Vorhersage: Bleibt es bei der derzeitigen Erwärmungsrate, so wird die Zahl neuer Monatsrekorde in 30 Jahren nicht nur um einen Faktor fünf, sondern um einen Faktor zwölf erhöht sein. Und diese neuen Rekorde werden dann nicht nur die heute schon bekannten Hitzerekorde übertreffen, sondern auch jene, die erst in 10 oder 20 Jahren auf uns zukommen. Was 2003 noch als »Jahrhundert-sommer« galt, wird dagegen der Normalfall sein. ☺

DIE AUTOREN



Gregor Wergen (links) hat in Köln Physik studiert. Im Rahmen seiner Promotion (ebenfalls in Köln) hat er sich intensiv mit dem Thema des vorliegenden Artikels auseinandergesetzt. Seit Kurzem arbeitet er als Berater in der Finanzindustrie. **Joachim Krug** (Mitte) ist Professor für theoretische Physik in Köln. Sein Arbeitsgebiet ist die statistische Physik komplexer Systeme. Auf die Theorie der Rekorde stieß er ursprünglich im Zusammenhang mit biologischen Evolutionsprozessen, die mittlerweile den Schwerpunkt seiner Forschungstätigkeit ausmachen. **Stefan Rahmstorf** hat in Konstanz Physik studiert und in Wellington (Neuseeland) in Ozeanografie promoviert. Er leitet die Abteilung Erdsystemanalyse am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und lehrt an der Universität Potsdam. Von 2004 bis 2013 war er Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen der Bundesregierung.

QUELLEN

Barriopedro, D. et al.: The Hot Summer 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe. In: *Science* 332, S. 220–224, 2011
Coumou, D. et al.: Global Increase in Record-Breaking Monthly-Mean Temperatures. In: *Climatic Change* 118, S. 771–782, 2013
Coumou, D., Rahmstorf, S.: A Decade of Weather Extremes. In: *Nature Climate Change* 2, S. 491–496, 2012
Rahmstorf, S., Coumou, D.: Increase of Extreme Events in a Warming World. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 108, 17905, 2011
Wergen, G., Krug, J.: Record-Breaking Temperatures Reveal a Warming Climate. In: *Europhysics letters* 92, 30008, 2010
Wergen, G. et al.: Record Statistics for Biased Random Walks, with an Application to Financial Data. In: *Physical Review E* 83, 051109, 2011

WEBLINKS

Diesen Artikel, weitere Literatur und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1216444

WIS wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht
über den Klimawandel können Sie kostenfrei
herunterladen unter

www.wissenschaft-schulen.de/treibhaus