

# Klimatrends in Temperaturreihen

Horst-Joachim Lüdecke  
26.Feb. 2013

## Zusammenfassung

Konstantes Klima ist unmöglich. Wetter und Klima ändern sich zu jeder Zeit und überall. In Temperaturreihen, die sich über mehrere Jahrzehnte erstrecken, zeigen sich Klimaschwankungen. Die in diese Reihen eingebrochenen Trendlinien deuten vordergründig auf äußere Ursachen hin, die freilich fast immer unbekannt sind. Die bis heute einzigen, zweifelsfrei gesicherten Ursachen sind extrem starke Vulkanausbrüche, deren globale Folgen mehrjährige Abkühlungstrends sind. Selbst vielen Fachleuten ist es immer noch unbekannt, dass sich Trends in Temperaturzeitreihen aber auch ganz ohne äußere Ursachen bilden können. Der Augenschein ist kein verlässlicher Zeuge, denn sogar sehr deutliche Trends sind keineswegs eine Gewähr für externe Ursachen. Die von selbst auftretenden Trends werden durch das „Gedächtnis“ (Persistenz) der Temperaturreihe erzeugt. Seit dem Jahre 2009 steht mit der modernen Persistenzanalyse ein Verfahren zur Verfügung, mit dem erstmals verlässlich entschieden werden kann, ob ein Trend in einer Temperaturzeitreihe eine äußere Ursache hat oder ob man umgekehrt dies nicht annehmen muss. Neben weiteren Anwendungen wurde mit dieser neuen Methode die globale Temperaturentwicklung des 20. Jahrhunderts an Hand von ca. 2500 Langzeit-Temperaturreihen analysiert. Hierbei zeigte sich, dass für die Erwärmung des 20. Jahrhunderts ein externer Einfluss zwar nicht ausgeschlossen werden kann, er allerdings dramatisch schwächer ist als die vom IPCC eingeschätzte Wirkung des anthropogenen CO<sub>2</sub>. Woher der nicht auszuschließende äußere Einfluss stammt, kann nicht mit der Methode entschieden werden. Es kommen auch andere Ursachen als das Treibhausgas CO<sub>2</sub> in Frage, zum Beispiel ein ungewöhnliches Verhalten der Sonne.

## 1. Was ist Persistenz in Temperaturzeitreihen?

Zeitreihen sind wichtige Werkzeuge, um Informationen über komplexe Prozesse zu gewinnen. Herzspezialisten nehmen Zeitreihen des Herzschlags oder des Blutdrucks auf, um Aufschlüsse über den gesundheitlichen Zustand eines Patienten zu erhalten. Finanz- und Versicherungsmathematiker analysieren Zeitreihen, um die finanziellen oder versicherungstechnischen Risiken von Unternehmen zu bewerten. Klimatologen verwenden Temperaturzeitreihen (Tages-, Monats- oder Jahresmittelwerte), um langfristige Klimatrends aufzufinden. Im Folgenden geht es hier um Temperaturzeitreihen.

Der englische Wasserbau-Ingenieur Harold Edwin Hurst untersuchte in den 1950-er Jahren die Tief- und Höchststände des Nils und entdeckte dabei als erster, dass hydrologische Zeitreihen ein Gedächtnis besitzen. Die aktuell gemessenen Werte hängen von den vergangenen, zum Teil weit zurückliegenden Werten ab. Später wurde erkannt, dass auch viele weitere Zeitreihen der Natur wie z.B. Baumringe ein Gedächtnis aufweisen. Man nennt dieses Phänomen Persistenz oder Autokorrelation. Die Schwankungen der Zeitreihe um ihren Mittelwert erfolgen in persistenten Zeitreihen nicht mehr unabhängig, sondern sie werden von der Vergangenheit der Zeitreihe beeinflusst.

Betrachtet man Temperaturzeitreihen, so erscheint dieses Verhalten zunächst nicht einmal so ungewöhnlich. Eine Temperaturzeitreihe weist zumindest ein "Gedächtnis" über die momentan herrschende Jahreszeit auf. Es kommt nie vor, dass auf einen warmen Sommertag plötzlich ein kalter Wintertag folgt, bzw. umgekehrt. Da jahreszeitlich bedingte Schwankungen im Allgemeinen weniger interessieren, werden die saisonalen Einflüsse vor der Persistenzanalyse aus einer Temperaturzeitreihe entfernt. Aber auch danach beobachtet man noch, dass ein Tagestemperaturmittelwert zumindest vom Vortag abhängt. So wird ein über dem längerfristigen Mittel liegender Temperaturwert am nächsten Tag mit über 50% Wahrscheinlichkeit ebenfalls über diesem Mittel liegen, Entsprechendes trifft für einen unter

dem Mittel liegenden Temperaturwert zu. Eine Erklärung für dieses Phänomen liefern anhaltende Wetterlagen. Persistenz über mehrere Wochen kann man mit meteorologischen Blocksituationen, wie etwa einem lang anhaltenden Azorenhoch erklären. Für noch längere Zeiträume ist freilich über die Ursachen von Persistenz wenig bekannt. Es werden dekadale Oszillationen wie z.B. der El Nino, Einflüsse aus den sich ändernden Planetenkonstellationen und weiteres mehr diskutiert. Erstaunlicherweise findet man in Temperaturzeitreihen Persistenz bis über mehrere Jahrzehnte. Die Ursachen solch langreichweiter Persistenz sind bis heute völlig unbekannt.

Persistenz in Temperaturzeitreihen kann bemerkenswerterweise empirisch mit nur einem Parameter beschrieben werden, dem berühmten Hurst-Exponenten  $\alpha$ . Mit der Fluktuationsanalyse (FA) bzw. der auf der FA aufbauenden, trendbereinigten Fluktuationsanalyse (DFA) wird  $\alpha$  ermittelt. Der hier interessierende Bereich von  $\alpha$  in Temperaturreihen ist  $0,5 \leq \alpha < 1$ . Eine Zeitreihe mit  $\alpha = 0,5$  ist rein zufällig (weißes Rauschen) und besitzt keine Persistenz. Für  $\alpha \geq 1$  ( $\alpha \approx 1$  entspricht rotem Rauschen) wird die Zeitreihe instationär, ihre Werte können "weglaufen" und niemals wieder den Anfangswert erreichen. Stationäre Zeitreihen behalten dagegen ihren Mittelwert über längere Zeiten bei. Gemessene Temperaturzeitreihen sind stationär, ihre Hurst-Exponenten liegen deutlich unter  $\alpha = 1$ . Nur fragwürdige Homogenisierungen [22], Glättungsprozeduren oder ähnliche Manipulationen können dies ändern. Die Hurst-Exponenten von sorgfältig gemessenen Temperaturzeitreihen, bei denen nur die unbedingt notwendigen Homogenisierungen vorgenommen wurden, bewegen sich im Bereich von etwa 0,55 bis 0,65. Temperaturzeitreihen von Stationen auf Inseln oder in Meeresnähe weisen höhere  $\alpha$ -Werte bis maximal etwa 0,9 auf.

## 2. Persistenz, Trends und Extreme

Persistenz von Temperaturzeitreihen sieht zuerst wie eine mathematische Rarität aus, tatsächlich ist sie jedoch von maßgebender Relevanz. Die Analyse von Zeitreihen ist nämlich vorrangig an dem Auftreten von Trends sowie von Extremen interessiert. Dabei hat man die Vorstellung, dass ausgeprägte Trends oder Extreme durch äußere Einflüsse bedingt sind. Tatsächlich kommen aber extreme Temperaturanstiege bzw. -abfälle oder ungewöhnlich lange Serien von Jahren mit Maximaltemperaturen bzw. Minimaltemperaturen auch ohne äußere Einflüsse vor. Ist dies der Fall, sind diese Trends oder Extreme "natürlich". Zumindest von stark ausgeprägten Extremen vermutet man freilich, dass sie unnatürlich sind. d.h. durch externe Einflüsse erzeugt wurden. Diese unzutreffende Annahme ist aus der Erfahrung täglichen Lebens abgeleitet. Ein Würfelspieler freut sich darüber, wenn die von ihm bevorzugte Zahl in Serie erscheint. Ist die Serie allerdings ungewöhnlich lang oder kommen gar solche Serien ungewöhnlich oft vor, argwöhnt man zutreffend eine externe Ursache, einen „gezinkten“ Würfel oder betrügerische Manipulation. Für Temperaturzeitreihen geht diese intuitive Beurteilung allerdings fehl. Der Grund dafür ist Persistenz.

**Die entscheidende Folge von Persistenz in Zeitreihen ist, dass ausgeprägte Trends und Extreme auf natürliche Weise mit zunehmender Persistenzstärke ebenfalls zunehmen.**

Diese Folge von Persistenz ist anschaulich verständlich. Persistenz bewirkt, dass die Zeitreihe die Tendenz aufweist, einen einmal angenommenen Wert beizubehalten. Auf diese Weise entstehen mehr Extreme und längere Trends. Damit wird der Stellenwert von Persistenz für Temperaturzeitreihen-Analyse deutlich. Finden wir beispielsweise in einer Temperaturzeitreihe des 20. Jahrhunderts einen Erwärmungstrend, so besagt dies keineswegs zwingend, dass hierfür eine unnatürliche Ursache, wie z.B. zunehmendes CO<sub>2</sub> oder

Stadterwärmung (UHI) verantwortlich sein muss. Der Trend könnte auch eine ganz natürliche Folge der Persistenz der Zeitreihe sein.

Vor näherem Eingehen auf Persistenz in Temperaturreihen soll zur Veranschaulichung des Phänomens gezeigt werden, wie man einem Würfel zu Persistenz verhelfen kann. Ein solcher Persistenzwürfel wird deutlich mehr Trends in Form von ungewöhnlich langen Serien gleicher Augenzahlen liefern. Dennoch bleibt er „fair“, d.h. alle Augenzahlen kommen auf Dauer gleich oft vor. Der Persistenzwürfel ist ein gewöhnlicher Würfel mit einer Besonderheit: wird er geworfen, und es erscheint beispielsweise die 5, hängt der Spieler ein kleines Gewicht an die gegenüberliegende Seite, also an die 2. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass auch weiterhin die 5 gewürfelt wird. Dennoch wird irgendwann eine andere Zahl auftauchen. Nun hängt der Spieler das Gewicht auf deren Unterseite. Würfelt man lange genug, kommen alle Augen mit gleicher Wahrscheinlichkeit vor. Dennoch erscheinen ungewöhnlich lange Serien von jeweils gleicher Augenzahl. Sie sind jedoch nur durch das zum System gehörige Gewicht bestimmt, nicht durch äußere Einflüsse (man kann sich den Mechanismus intern gesteuert vorstellen, ein Spieler, der die Gewichte anbringt, ist prinzipiell unnötig). Die langen Serien gleicher Zahlen treten rein zufällig auf und sind völlig natürlich.

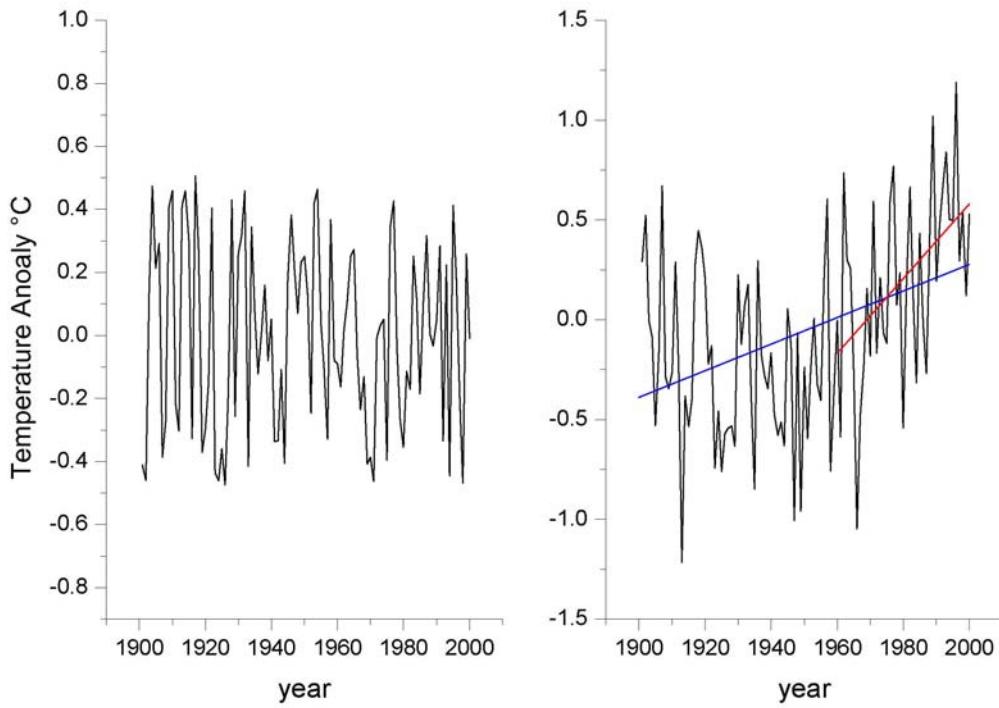
Im Gegensatz zu Temperaturreihen reicht das Gedächtnis des Persistenzwürfels allerdings nur einen einzigen Wurf zurück. Man kann dieses Verhalten mit einem sog. AR(1) Prozess modellieren. Persistenz in Temperaturreihen hat dagegen mit Modellprozessen, wie in AR-, MA- oder ARMA-Modellen [13] nichts zu tun. Persistenz ist eine empirische Eigenschaft ohne Modellgrundlage und sie ist prinzipiell beliebig langreichweitig. Man kann mit dem Computer synthetische Zufallszeitreihen erzeugen, die eine vorgegebene Persistenz, d.h. einen vorgegebenen Hurst-Exponenten  $\alpha$  aufweisen [1]. Mit Hilfe solcher Surrogatreihen lassen sich die durch Persistenz entstehenden Phänomene studieren.

### 3. Surrogatzeitreihen mit „Gedächtnis“

Surrogatzeitreihen, d.h. mit dem Computer erzeugte künstliche Zeitreihen, die zudem Persistenz aufweisen, sind ein entscheidendes Hilfsmittel zur Persistenzanalyse. Die Erzeugung von rechteckverteilten Zufallszahlen (Pseudozufallszahlen) mit dem Computer ist jedem EXCEL-Benutzer bekannt. Bildet man solche Zufallszahlen auf den Bereich von Jahresmitteltemperaturen ab, erhält man eine Temperaturzeitreihe mit dem Hurst-Exponenten von  $\alpha = 0,5$ . Eine solche Reihe sieht freilich unrealistisch aus, sie entspricht bereits dem Augenschein nach noch nicht der Gestalt einer real gemessenen Temperaturzeitreihe.

Surrogatzeitreihen werden „lebensechter“, wenn man ihnen zu Persistenz verhilft. Zur Veranschaulichung sei an das oben beschriebene Beispiel des Persistenzwürfels erinnert. Die Vermittelung von Persistenz an eine Temperaturzeitreihe erfolgt allerdings mit dem Computer - Details finden sich in der Originalliteratur [1], [24]. Surrogatzeitreihen des gleichen  $\alpha$  wie eine gemessene reale Reihe, weisen schon beim bloßen Anschauen eine große Ähnlichkeit mit gemessenen Reihen auf. Allerdings können reale Temperaturreihen einen externen Trend enthalten, Surrogatzeitreihen nicht. Man könnte Surrogatzeitreihen daher zutreffend als „natürlich“ bezeichnen, obwohl diese Bezeichnung etwas paradox erscheint, denn sie wurden schließlich vom Computer erzeugt. In konsequent gleichem Sprachgebrauch sind reale Temperaturreihen mit einem externen Trend „unnatürlich“.

Bild 1 zeigt ein Anschauungsbeispiel von Persistenz in Surrogatzeitreihen: Im linken Teilbild ist eine ausgewählte Zeitreihe mit  $\alpha = 0,5$  (keine Persistenz) gezeigt, im rechten Teilbild eine



*Bild 1: Synthetische Reihen ohne externen Trend. Linkes Teilbild mit Hurst Exponent  $\alpha = 0,5$ . Rechtes Teilbild mit  $\alpha = 0,73$ . Die Zeitreihe im rechten Teilbild ist ab 1950 offensichtlich von einem "Erwärmungstrend" bestimmt. Tatsächlich gibt es diesen externen Trend nicht, er ist zufällig und wird nur durch die Persistenz der Reihe verursacht.*

von  $\alpha = 0,73$ . Beide Zeitreihen sind Surrogate und enthalten daher keinen externen Trend. Dennoch ist im rechten Teilbild deutlich ein „Trend“ erkennbar, der ein wenig an den Verlauf der globalen Erwärmung im 20. Jahrhundert erinnert. Er ist rein natürlich und nur durch Persistenz bedingt. Nun entsteht die wichtige Frage: Woher erkennt man im konkreten Fall, ob ein Trend in einer real gemessenen Temperaturreihe extern ist?

#### 4. Die Suche nach externen Trends

Externe Trends in Temperaturreihen stehen zweifellos im Mittelpunkt der heutigen Klimadiskussion. So möchte man gerne wissen, ob die in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts von vielen Stationen gemessene globale Erwärmung ein vom industrialisierten Menschen verantworteter Trend oder aber nur ein durch Persistenz bedingter Artefakt ist. In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass die von den weltweit verstreuten Stationen gemessene Erwärmung im 20. Jahrhundert keinesfalls global einheitlich ausfällt. Etwa ein Viertel aller Stationen zeigt in diesem Zeitraum nämlich Abkühlung [6], [12]. Die mathematischen Hilfsmittel zur Persistenzanalyse von Temperaturreihen liefern die schon erwähnten Methoden der FA und der DFA. Eine ausführliche Beschreibung dieser Verfahren findet sich in [2], hier werden insbesondere auch sämtliche Originalliteraturquellen bis zum Jahre 2004 aufgeführt. Auf der Webseite von em. Prof. Bunde (Univ. Gießen) sind viele Originalpaper zur Persistenzanalyse, auf denen er als Mit- oder Hauptautor zeichnete, als pdf abgreifbar [23]. In [6] finden sich ebenfalls Literaturquellen. Schlussendlich ist der ausführliche und gut allgemeinverständlich gefasste Übersichtsaufsatz zur Persistenzanalyse von Bunde und Kantelhardt in den physikalischen Blättern hervorzuheben [21]. Die Originalarbeiten der hier im Mittelpunkt stehenden neuesten Methode der Persistenzanalyse, die schließlich unter 5. näher beschrieben wird, finden sich in [3] und [4].

In groben Zügen sieht die Arbeitsweise der „klassischen“ Persistenzanalyse wie folgt aus: Mit der FA wird aus einer Zeitreihe der Hurst-Exponent  $\alpha_{FA}$  ermittelt. Enthält die Reihe einen externen Trend, ergibt sich ein höheres  $\alpha_{FA}$  als ohne diesen Trend. Daher liefert die FA im Prinzip nur für Zeitreihen, die keine externen Trends enthalten, unverfälschte Ergebnisse des Hurst-Exponenten. Zur Behebung dieses Mangels wurde die DFA entwickelt. Sie beseitigt während des Berechnungsvorgangs automatisch polynomiale Trends einer vorgegebenen Ordnung aus der Zeitreihe. Zur Vereinfachung beschränkt man sich hierbei meist auf die Beseitigung von linearen Trends. Wird mit der DFA überhaupt kein Trend entfernt, liegt wieder die FA vor. Mit der DFA kann der automatisch beseitigte Trend leider nicht explizit angegeben werden. Da der Hurst-Exponent der DFA  $\alpha_{DFA}$  ist naturgemäß stets größer als der der FA  $\alpha_{FA}$ , kann die Differenz ( $\alpha_{DFA} - \alpha_{FA}$ ) als Stärke des externen Trends in der analysierten Temperaturreihe angesehen werden.

Bild 2 zeigt als Beispiel die Ergebnisse von FA- und DFA-Analysen (Beseitigung von linearen Trends) der Monatsmittelwertreihen von fünf der am weitesten bis ins 18. Jahrhundert zurückreichenden europäischen Wetterstationen. Aus den Monatsreihen wurde, wie bereits beschrieben, der saisonale Jahresgang entfernt. Ein doppelt-logarithmischer Plot erlaubt es dann, direkt aus der Steigung der charakteristischen Größe F(s) den Hurst-Exponenten  $\alpha$  abzulesen [2]. Die Hurst-Exponenten der FA sind, wie schon erwähnt, im Prinzip größer als die der DFA. Für unser Beispiel in Bild 2 folgt daraus, dass alle fünf Reihen (lineare) Trends enthalten. Die Frage, ob diese Trends unnatürlich sind, oder ob sie durch Persistenz entstanden sind, kann nicht ohne weiteres beantwortet werden. Allerdings fällt im vorliegenden Fall die Entscheidung leicht, weil alle fünf Reihen aus nicht allzu weit voneinander entfernten Stationen stammen, einen sehr ähnlichen Verlauf und schließlich auch ähnliche  $\alpha$ -Werte aufweisen. Somit liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit tatsächlich ein externer Trend vor.

Erst die in jüngster Zeit entwickelte Methode von Lennartz und Bunde, die nachfolgend beschrieben wird, kann dann die wichtige Frage nach der Unnatürlichkeit eines gemessenen Trends in einer einzelnen Temperaturzeitreihe quantitativ beantworten.

## 5. Die Methode von Lennartz und Bunde

Bis zum Jahre 2009 ergab für eine Temperaturzeitreihe nur der Vergleich ihrer beiden Hurst-Exponenten  $\alpha_{FA}$ ,  $\alpha_{DFA}$  aus der FA- und der DFA-Analyse einen Hinweis, ob ein beobachteter (linearer) Trend in ihr externen Ursprungs war. Diese einfache Strategie erlaubte freilich schon wichtige Aussagen. Sie wurde unter anderem in einer Publikation des Jahres 2003 auf 95 weltweit verstreute Temperaturzeitreihen angewendet. Dabei konnten keine Anzeichen für eine globale Erwärmung aufgefunden werden [5]. Lennartz und Bunde (im Folgenden LB) zeigten schließlich in zwei bahnbrechenden Fachaufsätzen der Jahre 2009 und 2011 [3], [4], dass eine wesentliche Erweiterung der oben beschriebenen klassischen Persistenzanalyse hin zu quantitativen Wahrscheinlichkeitsangaben möglich ist. Hierzu verwendeten sie Surrogat-Zeitreihen und untersuchten, wie häufig natürliche (lineare) Trends in ihnen vorkommen. Die maßgebende dimensionslose Größe ist dabei  $\Delta/\sigma$ .  $\Delta$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] ist der Temperaturanstieg bzw. der Temperaturabfall der linearen Regressionsgeraden über die gesamte Länge der Temperaturreihe und  $\sigma$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] die Standardabweichung um die Regressionsgerade herum.  $\Delta$

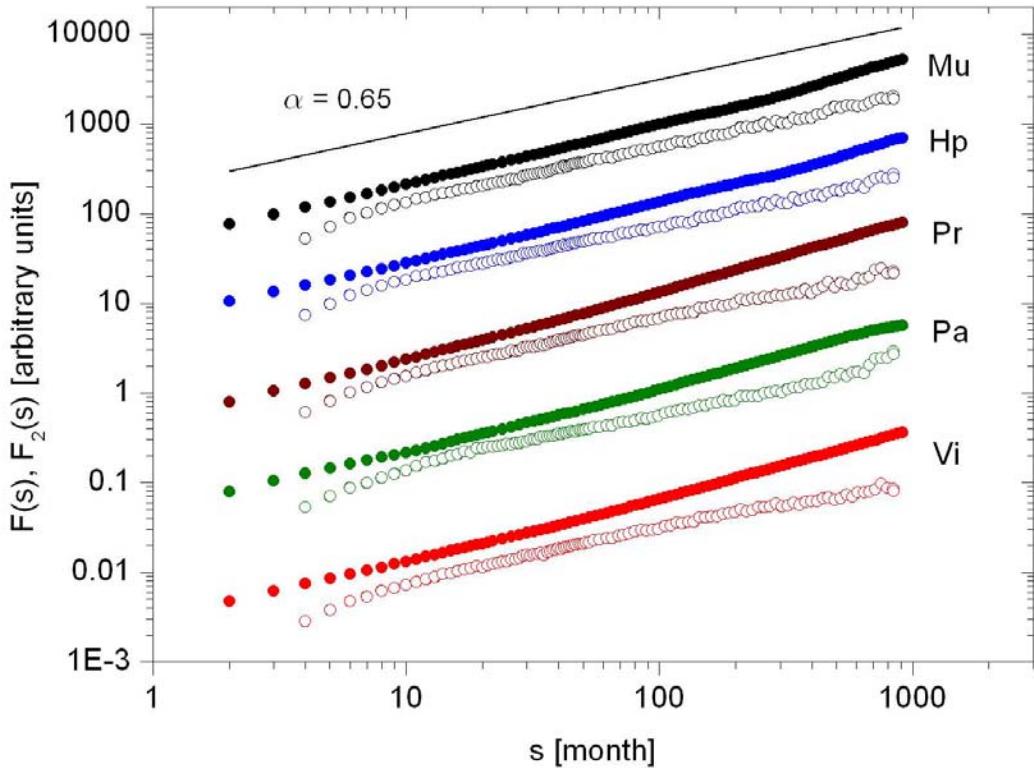


Bild 2: FA-Analyse (gefüllte Kreise) und DFA-Analyse (offene Kreise) für die Stationen München, Hohenpeissenberg, Prag, Paris und Wien. Die Länge des betrachteten Zeitraums beträgt 1791-2000. Man erhält Hurst-Exponenten zwischen 0,52 und 0,63 aus der DFA- und 0,63-0,71 aus der FA-Analyse.

ist durch die Standardabweichung zu dividieren, weil die Signifikanz eines Trends mit abnehmender Standardabweichung  $\sigma$  zunimmt. Weist die Reihe große Schwankungen, also eine große Standardabweichung  $\sigma$  auf, ist der Trend  $\Delta$  weniger signifikant als bei kleinem  $\sigma$ . Im Extremfall von  $\sigma = 0$  ist der Trend mit dem Verlauf der Zeitreihe identisch, im entgegengesetzten Extremfall beliebig großer Standardabweichung kann bei der geringsten Änderung irgendeines Wertes der Reihe die Regressionsgerade völlig anders verlaufen.

Aus unzähligen Surrogatreihen und Computer-Rechenläufen ermittelten LB für zwei Spezialfälle, nämlich Zeitreihen der festen Längen von 50 und 100 Jahren, charakteristische Diagramme bzw. die zu diesen gehörenden empirischen Rechenformeln [3]. Aus den Diagrammen kann abgelesen werden, mit welcher kumulierten Wahrscheinlichkeit  $W$  ein linearer Trend  $\Delta/\sigma$  unnatürlich (extern) ist. Im Jahre 2011 erweiterten LB ihre Methode schließlich auf allgemeine Zeiträume von 40 bis 160 Jahren Länge [4]. Bild 3 zeigt ein solches Diagramm (vom Autor erstellt) für den Fall von Surrogatreihen von 100 Jahren Länge.

In Surrogatreihen - es sei nochmals daran erinnert, dass Surrogatreihen frei von unnatürlichen Trends sind - treten naturgemäß positive und negative natürliche Trends  $\Delta/\sigma$  gleich häufig auf. Ferner kommen  $|\Delta/\sigma|$ -Werte zunehmender Stärke immer seltener vor. Dieser Effekt ist für den kleinsten Hurst-Exponenten von  $\alpha \approx 0.5$  (weißes Rauschen, keine Persistenz) naturgemäß am stärksten. In reinen Zufallsreihen ohne Persistenz ist es tatsächlich sehr unwahrscheinlich,

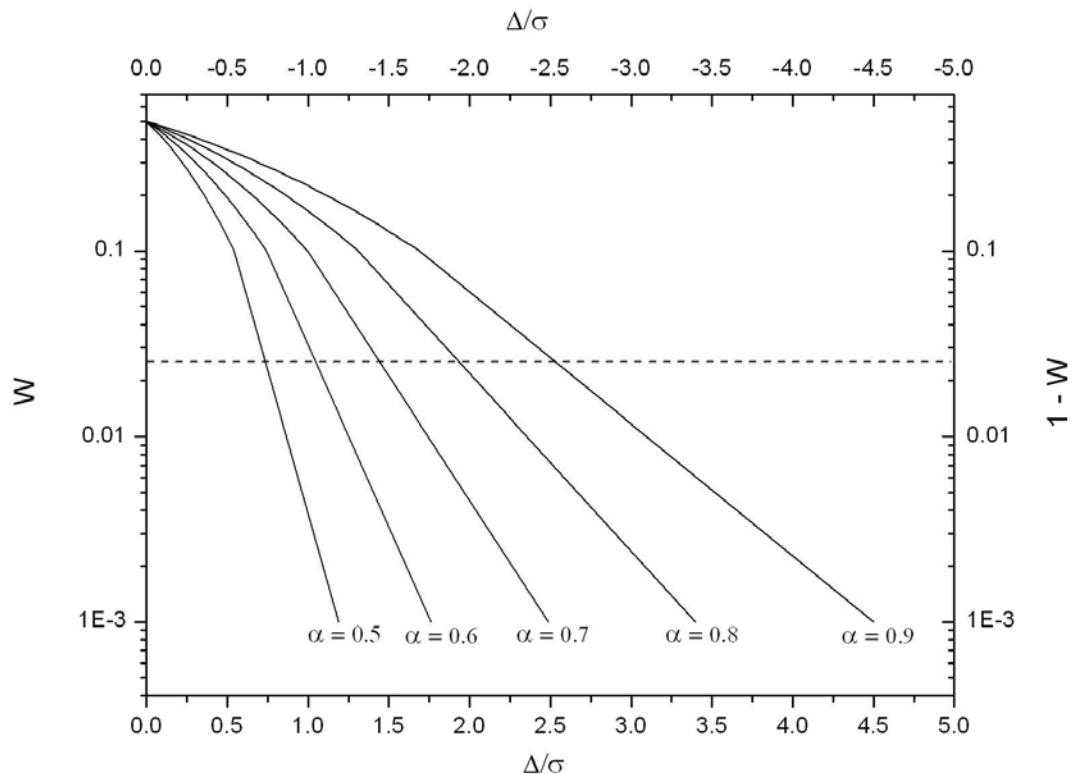


Bild 3: Kumulierte Wahrscheinlichkeit  $W$  für lineare Trends  $\Delta/\sigma$  in Abhängigkeit vom Hurst-Exponenten  $\alpha$  in Surrogatzeitenreihen von 100 Jahren Länge [6]. Für positive Trends ( $\Delta > 0$ ) ist die linke y-Skala und die untere x-Skala gültig, für negative Trends die rechte y-Skala und die obere x-Skala. Die gestrichelte Linie bei  $W = 0,025$  stellt ein Vertrauenslimit dar.

Trends mit großen  $|\Delta/\sigma|$ -Werten aufzufinden. Diese Situation ist dem Würfeln analog. Es ist extrem unwahrscheinlich, dass gleiche Augenzahlen zu oft in Reihe vorkommen.

Bei der Interpretation der Grafik in Bild 3 ist zu beachten, dass  $W$  kumulierte Wahrscheinlichkeiten sind. Dies sind hier Wahrscheinlichkeiten, einen Trend  $\Delta/\sigma$  irgendeines beliebigen Wertes, der über oder gleich einer bestimmten Schwelle liegt, aufzufinden. Betrachten wir nun die Surrogatzeitreihen! Da in ihnen keine externen Trends vorkommen, enthalten sie im Mittel gleich viele positive und negative natürliche Trends. Nehmen wir einen extrem starken negativen Trend  $-\Delta/\sigma$  als Schwelle und irgend ein festes  $\alpha$  an, so liegt die kumulierte Wahrscheinlichkeit  $W$ , in Surrogatreihe mit diesem  $\alpha$  einen Trend größer oder gleich dieser extrem starken negativen Schwelle aufzufinden, naturgemäß nahe bei 1. Schließlich enthalten fast alle Surrogatreihen mit diesem  $\alpha$  irgendwelche Trends, die sämtlich über  $-\Delta/\sigma$  liegen. Wird nun die (immer noch negative) Schwelle erhöht, verkleinert sich  $W$ . Die Schwelle  $\Delta/\sigma = 0$  schließlich wird im Mittel bereits von 50% aller Trends überschritten, daher ist  $W = 0,5$ . Liegt die Schwelle dann im positiven Bereich, wird  $W$  mit ansteigender Schwelle immer kleiner. Bei einem extrem hohen positiven  $\Delta/\sigma$  verschwindet schließlich  $W$  allmählich.

Das vorbeschriebene Verhalten zeigt die Grafik in Bild 3 mit konkreten Zahlen. Betrachten wir zur näheren Erläuterung 10.000 Surrogatreihen, alle mit  $\alpha = 0,7$  und einer Länge von 100 Jahren. Ferner ist zu beachten, dass für  $\Delta/\sigma > 0$  die untere x- und die linke y-Skala, für  $\Delta/\sigma \leq$

0 dagegen die obere x- und die rechte y-Skala gelten. Die Kurve für  $\alpha = 0,7$  beginnt für  $\Delta/\sigma = 0$  mit  $W = 0,5$  bzw. dem Wert  $(1-W) = 0,5$ . In 10.000 Surrogatreihen sind somit 5000 Reihen mit Trends  $\Delta/\sigma \geq 0$  und 5000 Reihen mit Trends  $\Delta/\sigma \leq 0$  enthalten (es ist stets das statistische Mittel ohne Fehlerschwankungen gemeint). Diese aus Bild 3 abzulesende Erkenntnis erscheint trivial. Betrachten wir als nächstes den sehr starken, negativen Wert  $\Delta/\sigma = -2,5$ . Dafür lesen wir aus der Grafik  $(1-W) \approx 10^{-3}$  ab. Dies bedeutet, dass 9990 von 10.000 Surrogatreihen der Länge von 100 Jahren und einem  $\alpha = 0,7$  einen 100-Jahrestrend von  $\Delta/\sigma \geq -2,5$  aufweisen. Für den größeren Wert  $\Delta/\sigma = -1$  lesen wir  $(1-W) = 0,1$  ab, somit ist  $W = 0,9$ . Somit weisen 9000 Surrogatreihen Trends mit Werten von  $\Delta/\sigma \geq -1$  auf. Für das noch größere  $\Delta/\sigma = -0,5$  sind wir bei  $(1-W) = 0,2$  angekommen, also bei  $W = 0,8$ , d.h. 8000 Surrogatreihen enthalten Trends von  $\Delta/\sigma \geq -0,5$ . Wenn schließlich der Wert  $(1-W) = W = 0,5$  erreicht ist, erhält man, wie bereits beschrieben, 5000 Reihen mit  $\Delta/\sigma$ -Werten  $\geq 0$ . Gehen wir nun zu positiven Trends über, etwa zu  $\Delta/\sigma = 1$ ! Wir lesen hierfür  $W = 0,1$  ab, somit enthalten nur noch 1000 Surrogatreihen Trends mit Werten  $\Delta/\sigma \geq 1$ . Für  $\Delta/\sigma = 2,5$  finden wir  $W = 0,001$ , also kommen in den 10.000 Surrogatreihen nur noch 10 Reihen mit Trends  $\Delta/\sigma \geq 2,5$  vor. Man erkennt aus dem Diagramm, dass (für positive Trends)  $W$  um mehrere Größenordnungen zunimmt, wenn  $\alpha$  nur innerhalb einer Größenordnung zunimmt.

Mit Hilfe der Grafik von Bild 3 wird die Strategie des Verfahrens von LB deutlich. Ein Trend in einer real gemessenen Reihe wird als extern (unnatürlich) angesehen, wenn er in Surrogatreihen des gleichen  $\alpha$  und der gleichen Länge zu selten vorkommt; genauer, wenn für positive Trends die kumulierte Wahrscheinlichkeit  $W < q$  bzw. für negative Trends  $W > (1-q)$  aus Bild 3 abgelesen wird.  $q$  ist ein frei wählbares statistisches Vertrauenslimit, gewöhnlich nimmt man  $q = 0,025$  oder 2,5%. In der praktischen Durchführung der Methode von LB wird der  $\Delta/\sigma$ -Wert der gemessenen Reihe und danach mit der DFA-Analyse ihr Hurst-Exponent  $\alpha$  ermittelt. Aus der Grafik von Bild 3 wird aus dem Wertepaar  $\Delta/\sigma, \alpha$  dann die kumulierte Wahrscheinlichkeit  $W$  abgelesen. Ergibt sich bei positiven Trends  $W < 0,025$ , liegt  $W$  also unter dem 2,5%-Limit, wird der Trend der realen Reihe als extern (unnatürlich) angesehen. Das ist anschaulich, denn Trendwerte die größer oder gleich dem in der realen Reihe beobachteten Trend sind, kommen in den von unnatürlichen Trends freien Surrogatreihen des gleichen  $\alpha$  nur in weniger als 2,5% aller Fälle vor. Für negative Werte ist das Limit  $W = 0,975$ , also 97,5%. Wird aus der Graphik von Bild 3 ein  $W > 0,975$  ermittelt, wird der beobachtete negative Trend als unnatürlich (extern) angesehen.

Die Persistenzanalyse von Temperaturreihen nach der Methode LB wurde von den Autoren in [3], [4] publiziert. Insbesondere haben LB ihr Verfahren in [3] auf 30 Einzelreihen und 15 Globalreihen angewendet. Globalreihen zeigen freilich im Gegensatz zu Einzelreihen ungewöhnlich hohe  $\alpha$ -Werte, die zum Teil sogar über 1 liegen. Damit wären viele Globalreihen instationär, Einzelreihen dagegen nicht, was widersprüchlich ist. Nach Auffassung des Autors des vorliegenden Aufsatzes wird dieser Effekt durch die Glättungs- und Homogenisierungseingriffe bei der Bildung von Globalreihen verursacht und macht daher Globalreihen zur Persistenzanalyse ungeeignet, s. hierzu auch die Kritik in [22]. Insbesondere wird durch Glättung bei der Globalreihenbildung die Standardabweichung  $\sigma$  unrealistisch klein und damit die Trends  $\Delta/\sigma$  zu stark. Leider gibt es bis heute noch keine Arbeit, die dediziert auf diese Probleme von Globalreihen eingeht. Nach Auffassung des Autors sind daher die in [3] gezogenen Schlussfolgerung über die globale Erwärmung wegen der Verwendung von Globalreihen in Frage zu stellen.

In einer Arbeit des Autors zusammen mit den Koautoren Dr. Link und Prof. Friedrich-Karl Ewert [6] wurden der oben beschriebenen Vorbehalte wegen Globalreihen grundsätzlich

ausgeschlossen. Mit dem Verfahren von LB wurden im Wesentlichen hier fast alle brauchbaren Einzelreihen weltweit - insgesamt etwa 2500 - analysiert. Für den Zeitraum von 1906 bis 2005 zeigen nur grob 30% aller Temperaturreihen aus Messtationen mit weniger als 1000 Einwohnern und unter 800 m üNN einen unnatürlichen (externen) Trend. Ein ähnliches, nicht ganz so deutliches Ergebnis wurde für den Zeitraum von 1956 - 2005 gefunden. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit das anthropogene CO<sub>2</sub> nur unmaßgeblich zur Erwärmung im 20. Jahrhundert beigetragen hat. Dieses Ergebnis wird durch den weiteren Umstand gestützt, dass neben anthropogenen Treibhausgasen auch noch eine ganze Reihe weiterer Ursachen für den leichten Erwärmungstrend im 20. Jahrhundert in Frage kommen, zum Beispiel ein ungewöhnliches Verhalten der Sonne (Magnetfeld). Zur Vermeidung von Missverständnissen wird nochmals darauf hingewiesen, dass die in [6] und [3] verwendete Methode identisch ist, die Schlussfolgerungen auf Grund der stark unterschiedlichen Datensätze aber nicht übereinstimmen. Insbesondere wurde in [6] im Gegensatz zu [3] gefunden, dass die globale Erwärmung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts „unnatürlicher“ als in der ersten Hälfte ist, was von [6] nicht bestätigt werden kann. Die Publikation [6] erfuhr hohe Resonanz, einige ihrer Besprechungen sind in [14-20] aufgeführt.

## 6. Zur heutigen Klimadiskussion

Bis heute gibt es keine begutachtete Fachpublikation, die einen anthropogenen Einfluss auf das Klimageschehen stringent nachzuweisen vermag. Die heutige Klimadiskussion dreht sich daher im Wesentlichen nur noch um die modelltheoretische Frage, ob die aus Labormessungen hergeleitete, unmaßgeblich kleine Klimasensitivität des CO<sub>2</sub> – sie liegt grob zwischen 0,5 °C und 1,1 °C – durch Mitkoppelungen verstärkt oder durch Gegenkoppelungen abgeschwächt wird. Eine verlässliche Antwort können nach dem bisher gültigen Paradigma physikalischer Forschung nur Messungen geben. Bis heute weisen bereits eine Reihe von Publikationen Gegenkoppelungen auf der Basis von Ballon- und Satellitenmessungen nach [7]-[11]. Messungen, die eindeutig Mitkoppelungen belegen, gibt es dagegen nicht, nur Klimamodelle mit dieser Eigenschaft. So ist beispielsweise der von diesen Klimamodellen geforderte Hot-Spot (eine Erwärmung in mehreren km Höhe über dem tropischen Gürtel der Erde) unauffindbar. Das vom IPCC entworfene Szenario einer durch anthropogenes CO<sub>2</sub> verursachten, gefährlichen globalen Erwärmung wird infolgedessen zunehmend unwahrscheinlicher. Diese Einschätzung wird durch die in [6] publizierten Ergebnisse auf der Basis der modernen Persistenzanalyse gestützt.

## 7. Zusammenfassung

Die moderne Persistenzanalyse von Lennartz und Bunde stellt einen wesentlichen Fortschritt gegenüber der „klassischen“ Persistenzanalyse dar [3], [4]. Sie erlaubt es erstmalig, die kumulierte Wahrscheinlichkeit anzugeben, mit der ein in einer Temperaturreihe auftretender linearer Trend externe Ursachen hat und daher nicht auf natürliche Weise durch Persistenz der Temperaturreihe entstanden sein kann. Mit historischen Temperaturreihen aus dem GISS-Pool wurde für den Zeitraum 1906-2005 mit der Methode von LB nachgewiesen, dass nur etwa 30% aller Reihen von Messtationen mit weniger als 1000 Einwohnern und Höhenlagen unter 800 m üNN externe Trends aufweisen [6]. Die Ursachen dieser Trends sind unbekannt. Neben anthropogenem CO<sub>2</sub> kommen ungewöhnliche Sonnenaktivität und weitere noch nicht näher bekannte Antriebe in Frage. Infolgedessen kann das anthropogene CO<sub>2</sub> bei der in klimahistorischem Maßstab ohnehin geringfügigen Erwärmung im 20. Jahrhundert nur eine unbedeutende Nebenrolle gespielt haben. Dieser Befund wird durch die jüngste globale Abkühlung, die nunmehr bereits etwa 17 Jahre andauert, untermauert.

## 8. Literaturnachweise

- [1] D.L. Turcotte: Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1997
- [2] J.W. Kantelhardt: Fluktuationen in komplexen Systemen, Habilitationsschrift, Univ. Gießen, 2004: [www.physik.uni-halle.de/Fachgruppen/kantel/habil.pdf](http://www.physik.uni-halle.de/Fachgruppen/kantel/habil.pdf)
- [3] S. Lennartz and A. Bunde: Trend evaluation in records with long-term memory: application to global warming, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L16706, doi:10.1029/2009GL039516, 2009
- [4] S. Lennartz and A. Bunde: Distribution of natural trends in long-term correlated records: a scaling approach, *Phys. Rev. E* 84, 021129, doi:10.1103/PhysRevE84.021129, 2011
- [5] J.F. Eichner, E. Koscielny-Bunde, A. Bunde, S. Havlin, and H.-J. Schellnhuber: Power-law persistence and trends in the atmosphere: A detailed study of long temperature records, *Phys. Rev. E* 68, 046133, 2003
- [6] H.-J. Lüdecke, R. Link, and F.-K. Ewert: How Natural is the Recent Centennial Warming? An Analysis of 2249 Surface Temperature Records, *Int. J. Mod. Phys. C*, Vol. 22, No. 10, 2011, [http://www.eike-klima-energie.eu/uploads/media/How\\_natural.pdf](http://www.eike-klima-energie.eu/uploads/media/How_natural.pdf)
- [7] G. Paltridge, A. Arking, and M. Pook: Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data, *Theor. Appl. Climatol.*, 98, p. 351-359, 2009
- [8] R.W. Spencer, and W.D. Braswell: On the misdiagnosis of surface temperature feedbacks from variations in Earth's radiant energy balance, *Remote. Sens.* 3, p. 1603-1613, 2011
- [9] R.S. Lindzen and Y.-S. Choi: On the determination of climate feedbacks from ERBE data, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L16705, 2009
- [10] R. Allan: Combining satellite data and models to estimate cloud radiative effect at the surface and in the atmosphere, *Meteorol. Appl.*, 18, p. 3245-333, 2011
- [11] H. Harde: How much CO<sub>2</sub> really contributes to global warming? Spectroscopic studies and modelling of the influence of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> on our climate, *Geophys. Res. Abstracts*, 13, EGU2011-4505-1, 2011
- [12] R. Muller, BEST, Berkeley University, 2011
- [13] <http://de.wikipedia.org/wiki/ARMA-Modell>
- [14] <http://judithcurry.com/2011/11/07/two-new-papers-vs-best/>
- [15] <http://judithcurry.com/2011/11/08/tols-critique-of-the-ludecke-et-al-papers/>
- [16] <http://judithcurry.com/2011/11/10/ludecke-et-al-respond/>
- [17] <http://judithcurry.com/2011/11/15/ludecke-et-al-respond-part-ii/>
- [18] [wmbriggs.com/blog/?p=4630](http://wmbriggs.com/blog/?p=4630)
- [19] [http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/weltklimakonferenz\\_2011/tid-24293/weltklimakonferenz-viel-laerm-um-nichts\\_aid\\_687885.htm](http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/weltklimakonferenz_2011/tid-24293/weltklimakonferenz-viel-laerm-um-nichts_aid_687885.htm)
- [20] WUWT: <http://tinyurl.com/ae342yp>
- [21] A. Bunde und J.W. Kantelhardt: Langzeitkorrelationen in der Natur: von Klima, Erbgut und Herzrhythmus, *Physikalische Blätter* 57, Nr. 5, S. 49-54, 2001
- [22] E. Steirou and D. Koutsoyiannis: Investigation of methods for hydroclimatic data homogenisation, European Geosciences Union General 2012, Vienna Austria 22-27 April 2012, Session HS.4/AS4.17/CL2.10, <http://itia.ntua.gr/en/docinfo/1212/>, 2012
- [23] <http://tinyurl.com/an65tf3>
- [24] H. Makse et al.: Method for Generating Long-Term Correlations for Large Systems, ArXiv, <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9512024>