

Statistische Zeitreihenanalyse der Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Temperaturen und Niederschläge in Deutschland (20. Jahrhundert)

Christian-D. Schönwiese

Motivation

Der Klimawandel zeigt sich in sehr unterschiedlichen räumlich-zeitlichen Strukturen. Mit Blick auf die Beobachtungsdaten können zur Erfassung der zeitlichen Strukturen Zeitreihenanalysen durchgeführt werden. Man erkennt dann im Allgemeinen relativ langfristige lineare oder nicht-lineare Trends und überlagert verschiedenartige Fluktuationen sowie einzelne Datenwerte, die sich davon deutlich abheben. Dem kann durch eine detaillierte struktur- oder auch ursachenorientierte Zeitreihenzerlegung nachgegangen werden (SCHÖNWIESE 2013a, 2013b).

Neben dem langfristigen systematischen Klimawandel finden dabei Extremwerte besondere Aufmerksamkeit, weil sich dahinter Ereignisse verbergen können, die erhebliche wirtschaftliche Schäden und oft auch Todesfälle verursachen. In Deutschland sind in jüngerer Zeit neben besonderen Sturmereignissen die Starkniederschläge des Sommers 2002, die zu Überschwemmungen u.a. im Elbebereich geführt haben, und der Hitzesommer 2003 besonders hervorgetreten (siehe hierzu u.a. Anhang A.8 in SCHÖNWIESE 2013b sowie die betreffenden Klimastatusberichte des DWD). Daher ist es von großem Interesse, festzustellen, ob solche Extremereignisse in ihrer Häufigkeit oder Intensität oder beidem zunehmen.

Analysemethodik

Zunächst stellt sich die Frage, was als extrem aufgefasst werden soll. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 1 relativ zu 1961-1990 die Zeitreihe der Sommertemperatur-Anomalien 1900-2012 für das Flächenmittel Deutschland (sog. Rasterdaten, Quelle: RAPP 2000, DWD) dargestellt. Es ist üblich, dann solche Datenwerte als extrem zu bezeichnen, die relativ stark vom Mittelwert bzw. Trend abweichen. Dazu benötigt man ein objektives Kriterium, beispielsweise die einfache, doppelte oder dreifache Standardabweichung (1σ , 2σ , 3σ). Daher sind in Abb. 1 parallel zum signifikant erkennbaren linearen Trend die 2σ -Grenzen eingezeichnet. Überschritten werden diese Grenzen nur von den Sommern 1947 und 2003, die demnach extrem warm gewesen sind. In die Nähe dieses Kriteriums kommen noch die Sommer 1911, 1983, 1992 und 1994 (jeweils Hitzesommer) sowie 1956, 1978 und 1987 (jeweils besonders kühle Sommer). Die gewünschten Trendaussagen zum Auftreten von Extremwerten sind aus so wenigen Daten allerdings nicht ableitbar, schon gar nicht deren Eintrittswahrscheinlichkeit.

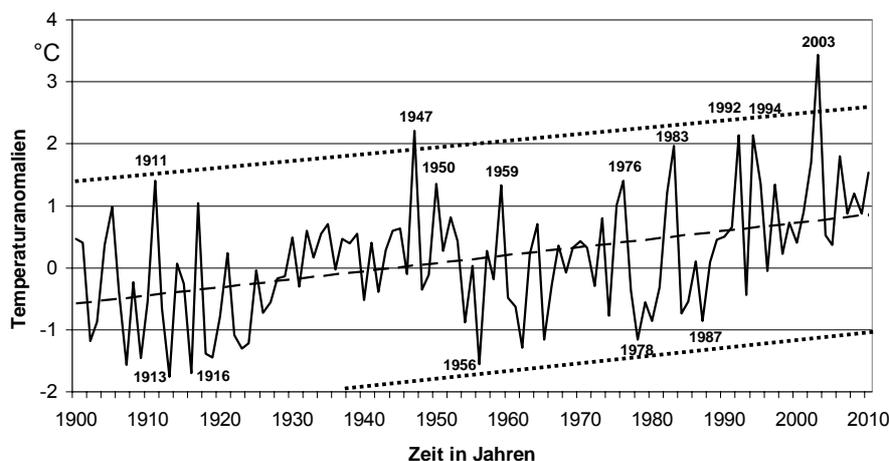


Abb. 1: Deutschland-Temperaturanomalien Sommer 1901-2010 mit linearem Trend (gestrichelt) und 2σ -Grenzen (gepunktet). Daten: RAPP 2000, DWD; Analyse: SCHÖNWIESE 2013a.

Daher hat TRÖMEL (2005) eine Methode entwickelt, die hier nur kurz skizziert werden kann. Danach werden die jeweiligen Zeitreihendaten in eine Häufigkeitsverteilung umgesetzt und es erfolgt die Anpassung einer geeigneten theoretischen Verteilung. In dieser Form spricht man von der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, engl. Probability Density Function PDF. Wie der Name sagt, lassen sich daraus Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmen, und zwar aus den bestimmten Integralen der interessierenden Wertebereiche, anschaulich aus den entsprechenden PDF-Flächenanteilen. Mit Blick auf die Extremwerte interessieren dabei speziell die PDF-Ränder. Als Extremwertkriterien treten nun an die Stelle der σ -Grenzen die Perzentile. Beispielsweise kann man bei der Temperatur den unteren 5 % der Werte (5%-Perzentil) die Eigenschaft „extrem kalt“ und den oberen 5 % (95%-Perzentil) die Eigenschaft „extrem warm“ zuordnen.

Der Clou dieser Betrachtung ist aber nun, die zeitliche Änderung der jeweiligen PDF zu erfassen. Dazu werden nach der TRÖMEL-Methode die Zeitreihen der Verteilungsparameter berechnet (hier auf Lage- und Streuparameter beschränkt), so dass im Fall von Trends (Änderung des Lageparameters) die PDFs sozusagen wandern, beispielsweise in Richtung höherer Werte und gleichzeitig im Fall der Veränderung des Streuparameters „breiter“ bzw. „schmäler“ werden. Damit verändern sich auch die Perzentil-orientierten Flächenanteile an den PDF-Rändern und daraus lässt sich ggf. Jahr für Jahr die Änderung der Eintrittswahrscheinlichkeit berechnen.

Ergebnisse der Temperaturanalysen

Dies soll zunächst anhand eines Beispiels demonstriert werden, siehe Abb. 2 (links). Dort ist die PDF der August-Mitteltemperatur Frankfurt/Main dargestellt und willkürlich soll $\leq 17^\circ\text{C}$ als extrem kalt (Schwellen-Unterschreitung) und $\geq 22^\circ\text{C}$ als extrem warm (Schwellen-Überschreitung) gelten. Man sieht, dass in der Zeit 1901-2006 die Unterschreitungswahrscheinlichkeit p -Unt. von 21,6 % auf 0,3 % abgesunken und die Überschreitungswahrscheinlichkeit p -Üb. von 0,1 % auf 16,2 % angestiegen ist. Dabei wird der Kehrwert von p als Jährlichkeit J bezeichnet. J gibt an, wie oft mit derartigen Ereignissen im statistischen Mittel (!) zu rechnen ist (z.B. entspricht $p = 0,1\%$ $\rightarrow J = 1000$ Jahre und $p = 16,2\%$ $\rightarrow J \approx 6,2$ Jahre). Bei sehr hohen Werten von J , die über die Zeitreihenlänge wesentlich hinausgehen, ist diese Angabe aber lediglich theoretisch.

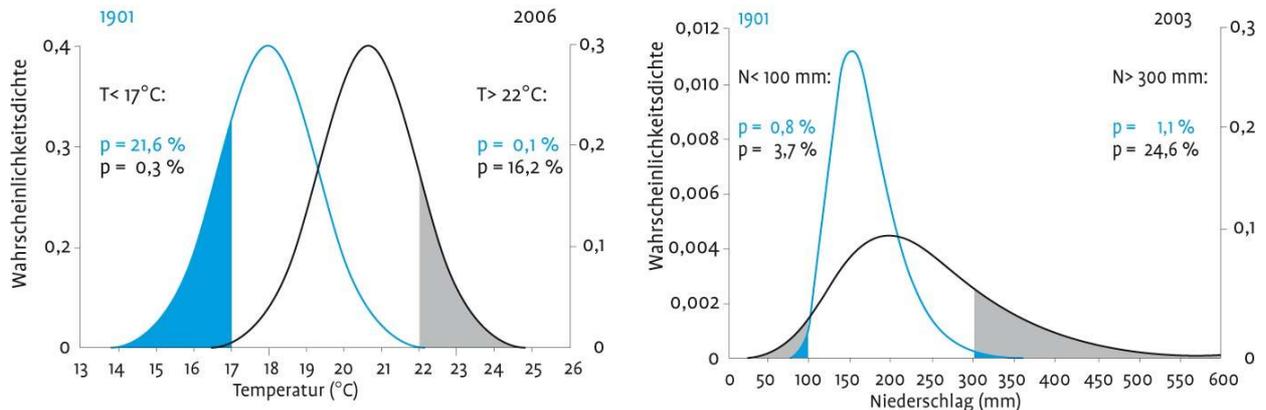


Abb. 2: Zeitliche Änderung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) von 1901 bis 2006 bzw. 2003 und Markierung der Flächenanteile (blau für 1901, grau für 2006 bzw. 2003), die ein Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremwerten sind. Links: August-Temperatur in Frankfurt/M., rechts Winter-Niederschlag Eppenrod (bei Limburg), Schwellenwerte hier willkürlich, vgl. Angaben in der Grafik und Text (SCHÖNWIESE et al. 2006, ergänzt, hier nach SCHÖNWIESE 2013b).

Im Rahmen eines DEKLIM-Projektes (Deut. Klimaforschungsprogramm), über das bei BECK et al. (2007) ausführlich berichtet wird, sind unter anderem die Temperatur-Monatsdaten 1901-2000 von 12 Stationen in Deutschland nach der oben skizzierten Methode analysiert worden, wobei als PDF-Typ jeweils die Normalverteilung zugrunde gelegt werden konnte (wie in Abb. 2, links). Dabei

ergab sich, analog zu Abb. 2, jedoch Perzentil-orientiert (5 % bzw. 95%) systematisch eine Abnahme der Unterschreitungswahrscheinlichkeit p -Unt. und eine Zunahme der Überschreitungswahrscheinlichkeit p -Üb., allerdings von Station zu Station und von Monat zu Monat quantitativ etwas unterschiedlich (Abbildung hier nicht gezeigt). Beispielsweise hat an der Station Frankfurt/M. p -Üb. im August von (jeweils rund) 1 % auf 13 % und im Januar von 2 % auf 8 % zugenommen, wobei die Schwellenwertkriterien (95%-Perzentil) in diesem Fall 21,1 °C bzw. 5,1 °C sind (alle weiteren Details siehe BECK et al. 2007, zum Hitzesommer 2003 auch SCHÖNWIESE et al. 2004).

Ergebnisse der Niederschlagsanalysen

Wesentlich uneinheitlicher sind die Ergebnisse der entsprechenden Niederschlagsanalysen, wobei die Monatsdaten 1901-2000 von 132 Stationen zugrunde lagen. Als Verteilungstyp erschien hier die Gumbel-Verteilung als geeignet. Das Beispiel Winterniederschlag 1900-2003 in Eppenrod (Lahn-Einzugsgebiet bei Limburg, vgl. Abb. 2, rechts) offenbart, dass sich außer dem Lageparameter (somit Trend) auch der Streuparameter verändert hat, die Verteilung somit „breiter“ geworden ist. Definiert man zunächst wieder willkürlich ≤ 100 mm als extrem wenig und ≥ 300 mm als extrem viel, so ist hier sowohl p -Unt. als auch p -Üb. angestiegen, und zwar von 0,8 % auf 3,7 % bzw. von 1,1% auf 24,6 %. Somit hat im betrachteten Zeitintervall sowohl die Neigung zu extrem wenig als auch zu extrem viel Niederschlag zugenommen, letzteres allerdings deutlich stärker als ersteres, und alles jeweils auf Kosten mittlerer Gegebenheiten.

In Abb. 3 sind nun die Perzentil-orientierten p -Unt. und p -Üb.-Zeitreihen 1901-2000 für die ausgewählten Monate Januar, Mai, August und November und wiederum die Station Eppenrod dargestellt (5%- bzw. 95%-Perzentil). Dabei entspricht der Januar dem in Abb. 2 (rechts) wiedergegebenen Verhalten: Sowohl p -Unt. als auch p -Üb. haben zugenommen. Dagegen ist im August p -Üb. ungefähr gleich geblieben, während p -Unt. abgenommen hat. Das bedeutet, dass die PDF „schmäler“ geworden ist. Entsprechende Ergebnisse für andere Stationen sind BECK et al. (2007) und insbesondere TRÖMEL (2005) zu entnehmen; siehe auch TRÖMEL und SCHÖNWIESE (2007). Erwähnt sei hier nur, dass das in Abb. 3 erfasste Verhalten typisch für relativ viele Stationen im Westen von Deutschland ist. Hinsichtlich p -Üb. zeigt sich dagegen im Osten von Deutschland (z.B. Görlitz) ein annähernd konstant niedriges Niveau in den Wintermonaten und ein hohes Niveau mit unterschiedlichen Trends in den Sommermonaten. Ähnlich ist das im Süden (z.B. Marktoberdorf, Allgäu), allerdings mit deutlichen Zunahmen im Juli und August. Hinsichtlich p -Unt. findet sich im Osten (z.B. wiederum Görlitz) im Januar, ähnlich wie in Abb. 3 (links), eine deutliche Zunahme.

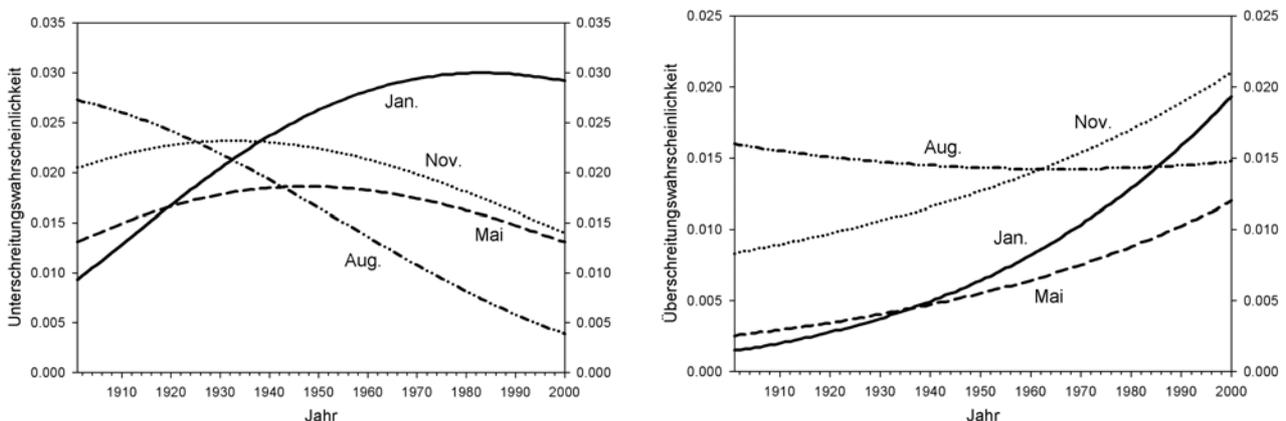


Abb. 3: Zeitreihen der Unterschreitungswahrscheinlichkeit p -Unt. (links) und der Überschreitungswahrscheinlichkeit p -Üb. (rechts), jeweils perzentilorientiert (5 %, hier entsprechend 10 mm-Schwelle, bzw. 95 %, hier entsprechend 180 mm-Schwelle) an der Station Eppenrod in ausgewählten Monaten (SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2005, siehe auch TRÖMEL und SCHÖNWIESE 2007).

Um schließlich einen Überblick über das p-Üb.-Verhalten des Niederschlags Deutschland-weit zu gewinnen, was als Indiz für die Tendenz der Hochwassergefährdung gelten kann, so sieht man anhand von Abb. 4 im Januar fast flächendeckend eine Zunahme, auch wenn sich dieser Befund in Richtung Nordosten (Schleswig-Holstein ausgenommen) allmählich verliert. Das bedeutet im Winter (ungefähr Norden, Westen und Süden; Osten nur teilweise und wenn, dann in deutlich geringerem Ausmaß) eine zunehmende Hochwassergefährdung. Dagegen treten im August markante Unterschiede auf: An den meisten süddeutschen Stationen wie auch entlang des Rheins und in Teilen Schleswig-Holsteins hat pÜ zugenommen ansonsten – und dies fast im gesamten Gebiet östlich der Weser – abgenommen. Das bedeutet im Sommer für die Flusseinzugsbereiche von Elbe und Weser eine geringer werdende Hochwassergefahr, für Donau, Main und Rhein dagegen eine zunehmende, wobei Starkniederschlag natürlich nur eine Randbedingung für das Eintreten von Hochwasser ist, aber sicherlich eine wichtige.

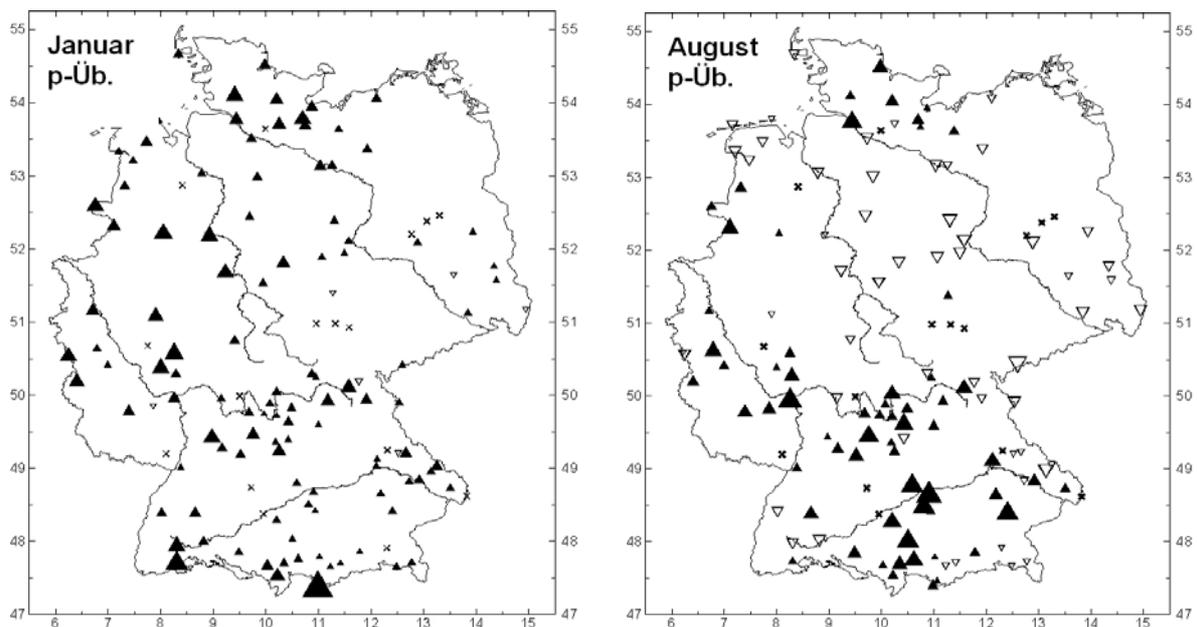


Abb. 4: Trends 1901-2000 der Überschreitungswahrscheinlichkeit p-Üb. extremer monatlicher Niederschläge (95%-Perzentil) in Deutschland (132 Stationen), links Januar, rechts August, wobei ausgefüllte nach oben weisende Dreiecke Zunahme, leere nach unten weisende Dreiecke Abnahme und x keine signifikante Änderung bedeuten. Zudem weist die Größe der Symbole auf Trendstärke hin (hier zwischen ca. 5 % und 15 %); nach TRÖMEL 2005, vereinfacht (siehe auch BECK et al. 2007 sowie TRÖMEL und SCHÖNWIESE 2007).

Schlussfolgerungen

Eine Zeitreihenmodellierung, die alle zur Verfügung stehenden Daten nutzt und dabei die zeitlichen Veränderungen der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) erfasst, ist geeignet, Zeitreihen der Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit von Schwellenwerten zu erzeugen, die extrem niedrige bzw. extrem hohe Werte definieren. Dabei erscheint eine Orientierung an den Perzentilen (z.B. 5 % bzw. 95 %) sinnvoll. Für Deutschland ergeben sich bei der Temperatur 1901-2000 generell Abnahmen der Unter- und Zunahmen der Überschreitungswahrscheinlichkeit, während beim Niederschlag das Bild uneinheitlich ist. Die auf Hochwassergefährdung hinweisende Überschreitungswahrscheinlichkeit hat 1901-2000 im Winter fast flächendeckend zugenommen, im Sommer dagegen nur teilweise, vor allem in Süddeutschland und entlang des Rheins. Ob diese für die Vergangenheit durchgeführte Analyse auch Relevanz für die Zukunft hat, müssen (regionale) Klimamodellrechnungen zeigen, die jedoch gerade bei Extremwerten und dabei insbesondere beim Niederschlag nicht besonders zuverlässig sind.

Literatur

- BECK, C., RUDOLF, B., SCHÖNWIESE, C.-D., STAEGER, T., TRÖMEL, S., 2007: Entwicklung einer Beobachtungsdatengrundlage für DEKLIM und statistische Analyse der Klimavariabilität (Projekt VasClimO). Bericht Nr. 6, Inst. f. Atmosphäre u. Umwelt, Univ. Frankfurt/M., 107 S.
- DWD (DEUT. WETTERDIENST): Anomalierasterdaten Deutschland, abrufbar für gewünschte Jahre und Monate. Internet, <http://www.dwd.de> → Klima und Umwelt, Klimamonitoring, Deutschland, Resultate monatlich, Klimakarten Deutschland.
- RAPP, J., 2000: Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 145 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 2013a: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 5. Aufl., Borntraeger, Stuttgart, 319 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 2013b: Klimatologie. Ulmer (UTB), 4. Aufl., 489 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D., STAEGER, T., STEINER, H., BRINCKMANN, S., 2006: Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901 bis 2003. Bericht Nr. 3, Inst. f. Atmosphäre u. Umwelt, Univ. Frankfurt/M., 74 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D., STAEGER, T., TRÖMEL, S., 2004: The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. Meteorol. Z. 13, 323-327.
- SCHÖNWIESE, C.-D., TRÖMEL, S., 2005: Langzeitveränderungen des Niederschlages in Deutschland. In: LOZAN, J.L. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Wiss. Auswertungen (in Kooperation mit GEO), Hamburg, S. 182-187.
- TRÖMEL, S., 2005: Statistische Modellierung von Klimazeitreihen (Dissertation). Bericht Nr. 2, Inst. f. Atmosphäre u. Umwelt, Univ. Frankfurt/M., 238 S.
- TRÖMEL, S., SCHÖNWIESE, C.-D., 2007: Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany. Theor. Appl. Climatol. 87, 29-39.
- Anschrift des Autors: Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese, Institut für Atmosphäre und Umwelt, Goethe-Universität, Postfach 111932, D-60054 Frankfurt a.M.; E-Mail: schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de