

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Kurzbericht zum
Forschungsvorhaben 201 41 254

Berechnung der Wahrscheinlichkeiten
für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen
– Schwerpunkt Deutschland –

von

Dipl.-Met. Martin Jonas, Dr. Tim Staeger
und Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese

Institut für
Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main
Arbeitsgruppe Klimaforschung

Arbeitsgruppenleiter
Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

April 2005

Dieses Vorhaben wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplans – FuE-Vertrag Gz. Z1.6-50477/205, Förderkennzeichen 201 41 251 – erstellt und mit Bundesmitteln finanziert. Die Kurz- und Langfassung sind auf der Klimaschutzseite der Homepage des Umweltbundesamtes unter folgender Adresse abrufbar: <http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/index.htm>.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Es ist vorgesehen, den ausführlichen Bericht von den gleichen Autoren unter gleichem Titel zu veröffentlichen, und zwar als Bericht Nr. 1, Institut für Atmosphäre und Umwelt, Universität Frankfurt/Main, 2005.

Anschrift: J.W. Goethe-Universität, Institut für Atmosphäre und Umwelt
Postfach 11 19 32, D-60054 Frankfurt a.M.
Telefon: 069-798-23578 /-22321
Fax: 069-798-22482
E-Mail: Martin.Jonas@meteor.uni-frankfurt.de
Staeger@meteor.uni-frankfurt.de
Schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de
Homepage: <http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima>

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

- 1 Einführung und Zielsetzung
- 2 Datengrundlage
- 3 Zeitlich gleitende Extremwertanalyse
 - 3.1 Methodik
 - 3.2 Ergebnisse
- 4 Strukturorientierte Zeitreihenzerlegung
 - 4.1 Methodik
 - 4.2 Ergebnisse
- 5 Fallbeispiele
- 6 Schlussfolgerungen

Literatur (Auswahl)

Anhang: Erklärung einiger Fachbegriffe

Zusammenfassung

Datenbasis und Methodik

Der *globale Klimawandel*, der sich auch in *Deutschland* feststellen lässt, steht mit Recht im Blickpunkt des öffentlichen Interesses, weil zumindest in den letzten Jahrzehnten der Klimafaktor Mensch dabei eine nicht mehr zu übersehende Rolle spielt und weil seine Auswirkungen den gesamten ökologischen sowie sozioökonomischen Bereich betreffen. Dabei sind offensichtlich Extremereignisse von ganz besonderer Bedeutung. Es stellt sich somit die drängende Frage, ob sie sich in ihrer Häufigkeit bzw. Intensität im Rahmen des bisher beobachteten Klimawandels verändert haben.

Daher wurden in dieser Studie stationsbezogene monatliche und tägliche *Messdaten der bodennahen Lufttemperatur, des Niederschlages und des Windes* in Deutschland und zum Teil auch in Mitteleuropa für den Zeitraum 1901-2000 sowie unter erheblicher Stationsverdichtung für den Zeitraum 1951-2000 im Hinblick auf Änderungen ihres Extremverhaltens untersucht. Zwei verschiedene *Methoden* kamen dabei zur Anwendung: Die „zeitlich gleitende Extremwertanalyse“ (Methode I, Kap. 3) geht für den betrachteten Zeitraum, der in zeitlich gleitende Subintervalle unterteilt ist, von festen Schwellenwerten aus und betrachtet deren Über- bzw. Unterschreitung. An die Zeitreihen der Klimadaten werden dann sowohl empirische als auch theoretische Häufigkeitsverteilungen angepasst, um daraus extremwert-theoretische Größen wie Wartezeit, Wiederkehrzeit und Risiko abzuleiten.

Dagegen sucht die „strukturorientierte Zeitreihenzerlegung“ (Methode II, Kap. 4), zwar ebenfalls unter Zugrundelegung einer geeigneten theoretischen Verteilung, aber unter Nutzung aller Daten der jeweiligen Zeitreihe, nach zeitabhängigen Strukturen und entsprechenden Parameter-Zeitserien der jeweils zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Dadurch lassen sich zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsfunktionen für das Über- bzw. Unterschreiten beliebiger Schwellen angeben.

Ergebnisse

Die zeitlich gleitende Analyse (*Methode I*) zeigt bei den Niederschlagsmonatsdaten in ganz Deutschland für untere Schranken einen Trend zu seltenerem Auftreten von Extremereignissen; relativ trockene Monate sind somit seltener geworden. Bei oberen Schranken, das heißt extremen Starkniederschlägen, existiert hingegen im Osten ein Trend zu seltenerem, im Westen ein Trend zu häufigerem Auftreten. Im Gegensatz zum Westen ist also im Osten der Niederschlag insgesamt weniger extrem geworden. Bei den Niederschlagstagesdaten sind die Ergebnisse ähnlich, jedoch deutlich mehr schrankenabhängig; das heißt, je nachdem, wie hoch bzw. niedrig die Schranken für Extremwerte gesetzt werden, ergeben sich unterschiedliche Trends der Eintrittswahrscheinlichkeit. Insgesamt überwiegt aber auch bei den Tagesdaten ein Trend zu extremeren Niederschlägen, insbesondere im Westen von Deutschland.

Bei den Temperaturdaten zeigen die Ergebnisse dieser Analyse (Monats- und Tagesdaten) mit wenigen Ausnahmen ein selteneres Eintreten von Extremereignissen unterhalb unterer Schranken und ein häufigeres Auftreten oberhalb oberer Schranken, wie das der Trend zu einem wärmeren Klima auch erwarten lässt.

Bei der „strukturorientierten Zeitreihenzerlegung“ (*Methode II*) zeigt sich dementsprechend, dass die monatlichen und saisonalen Temperatur-Daten überwiegend positive Trends im Mittelwert aufweisen, während sich die Streuung nur in Ausnahmefällen verändert. Dies führt zu teilweise

deutlich gestiegenen Wahrscheinlichkeiten für besonders warme Monate (Ausnahme: Herbst, Datensatz 1951-2000) und abnehmende Wahrscheinlichkeiten für extrem kalte. Dies entspricht einer zunehmenden Wahrscheinlichkeit von besonders warmen Tagen, vor allem im Winter hinsichtlich des Tagesmaximums, und selteneren kalten Tagen in allen Jahreszeiten, insbesondere in Süddeutschland. Da Hitzerekorde jedoch im Sommer auftreten, ist auch der Trend zu mehr extrem heißen Sommern sehr auffällig.

Beim Niederschlag dominieren ausgeprägt jahreszeitliche Unterschiede: Im Winter findet sich sowohl ein Trend zu höheren Monats- und saisonalen Summen als auch eine erhöhte Variabilität, was verbreitet zu einer deutlichen Zunahme von extrem hohen Niederschlagssummen in dieser Jahreszeit führt. Dagegen wurde im Sommer ein Trend zu einer verringerten Variabilität gefunden, wodurch auch extrem hohe monatliche und saisonale Niederschlagssummen in dieser Jahreszeit verbreitet seltener geworden sind. Alles das gilt auch für weite Teile Mitteleuropas. Entsprechend haben Tage mit hohen (über dem oberen 10%-Perzentil) und auch extrem hohen (über dem oberen 5%- und 2%-Perzentil) Niederschlagssummen im Sommer verbreitet ab-, in den anderen Jahreszeiten (vor allem im Winter und in Westdeutschland) jedoch zugenommen.

Beim Wind sind die Ergebnisse recht uneinheitlich, so dass hier keine klaren allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können. Dies hängt vermutlich auch mit der relativ großen Fehlerbelastung zusammen. Mit einiger Vorsicht lässt sich für Deutschland jedoch sagen, dass tendenziell die Wahrscheinlichkeit extrem hoher täglicher Windmaxima im Winter eher zu- und im Sommer eher abgenommen hat.

1 Einführung und Zielsetzung

Der globale Klimawandel, insbesondere der seit Beginn des Industriezeitalters im globalen Mittel zu beobachtende Anstieg der bodennahen Lufttemperatur, gilt zumindest für die letzten Jahrzehnte als anthropogen dominiert. Denn er geht nach wissenschaftlichem Verständnis, das sich sowohl auf zum Teil sehr aufwendige Klimamodellrechnungen (IPCC 2001) als auch auf die Analyse von Beobachtungsdaten abstützt (Grieser et al., 2000, Schönwiese 2003), vor allem auf die Emission klimawirksamer Spurengase (CO₂ usw.) zurück (anthropogener Treibhauseffekt), und dies vor allem aufgrund der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas) und Waldrodungen.

Offenbar hat Deutschland in der Zeit 1901-2000 mit einem Anstieg der Jahresmittel-Temperatur um 1,0 °C (Flächenmittel; global: 0,7 °C) daran überproportional teilgenommen (Rapp 2000, Schönwiese und Janoschitz 2005); für andere Zeitspannen gelten wegen der stets überlagerten Fluktuationen andere Werte, so 0,8 °C für die Zeit 1891-1990 sowie 1901-2004. Außerdem gibt es erhebliche jahreszeitliche Unterschiede und selbst innerhalb eines so kleinen Gebiets wie Deutschland auch ausgeprägte regionale Strukturen. Das trifft in noch weit größerem Ausmaß auf den Niederschlag zu, bei dem vor allem der winterliche Anstieg (mit Schwerpunkten im Westen) und der – quantitativ deutlich geringere und auf zeitlich variable Teilregionen beschränkte – Rückgang im Sommer bemerkenswert sind.

In diesem Zusammenhang ist nun die Frage von Interesse, ob dieser Klimawandel auch mit einer Änderung der Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit und Intensität von Extremereignissen verbunden ist; denn gerade solche Extremereignisse sind es, die besonders gravierende Auswirkungen ökologischer sowie sozioökonomischer Art aufweisen (auf spezielle Fallbeispiele wie den Hitzesommer 2003 und das Elbe-Hochwasser 2002 wird in Kap. 5 eingegangen). Um dies zu klären, ist es notwendig, sich die Häufigkeitsverteilungen der betrachteten

klimatologischen Größen anzusehen. Dabei ist es in der Statistik üblich, an die jeweilige empirische Häufigkeitsverteilung nach dem Prinzip maximaler Ähnlichkeit eine theoretische Verteilung anzupassen, um von zufälligen Stichprobeneigenschaften unabhängig zu sein (Schönwiese 2000) und damit allgemeingültigere Aussagen treffen zu können.

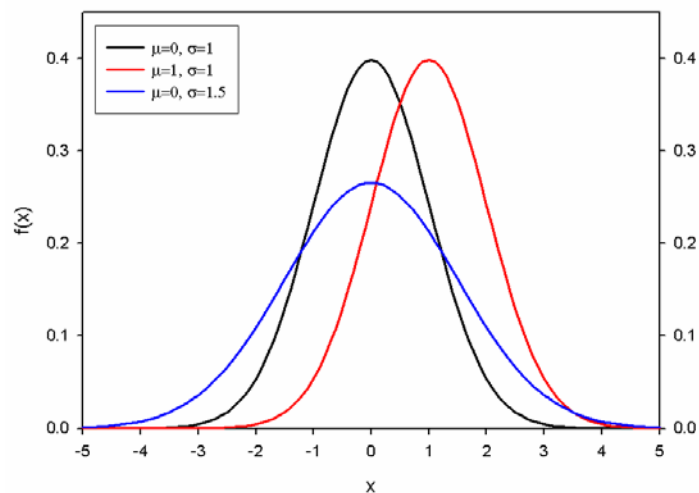


Abbildung 1: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) der *Gauß-Verteilung* (Normalverteilung) mit verschiedenen Parameterkombinationen (vgl. Text).

Der einfachste Typ ist die Gauß-Verteilung (Normalverteilung), vgl. Abb. 1, die bezüglich des Mittelwertes μ (in diesem Fall zugleich häufigster Wert = Modus) symmetrisch ist. In Folge einer Klimaänderung, beispielsweise in Form eines Trends, kann sie sich in Richtung der x-Werte verschieben (Übergang von der schwarzen zur roten Kurve in Abb. 1). Sie kann aber auch „breiter“ werden, wenn die Streuung der Daten zunimmt (charakterisiert durch die Standardabweichung σ), was höhere Variabilität bedeutet (Übergang von der schwarzen zur blauen Kurve in Abb. 1). Schließlich können sich auch beide Parameter ändern, wobei allgemein vom Lageparameter (hier μ) und Streuparameter (hier σ) gesprochen wird. Alles das hat nun Auswirkungen auf die Extremwerte, die üblicherweise als relativ große bzw. relativ kleine x-Werte definiert werden. Bezüglich der schwarzen Kurve in Abb. 1 könnten dies z.B. die Werte $x > 2$ oder $x > 3$ (obere Schwellenwerte) bzw. $x < -2$ oder $x < -3$ (untere Schwellenwerte) sein.

Da die Kurven in Abb. 1 so normiert sind, dass das Integral über alle x-Werte (anschaulich die Fläche unter der jeweiligen Kurve) gleich 1 (entsprechend 100 %) ist, geben sie für beliebige x-Intervalle die Wahrscheinlichkeit an, mit der diese Werte auftreten. Folglich spricht man von der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function PDF). Man erkennt nun in Abb. 1 weiterhin, dass die Fläche und somit Wahrscheinlichkeit, dass z.B. Werte $x > 2$ auftreten, sowohl bei der roten als auch blauen Kurve deutlich größer ist als bei der schwarzen. Da zudem die schwarze Kurve so normiert ist, dass $\mu=0$ und $\sigma=1$ ist, stellen die x-Werte zugleich die Schranken der einfachen, doppelten usw. Standardabweichung dar (1σ -, 2σ - usw. Schwellen), wie sie im folgenden zum Teil benutzt werden. Eine ebenfalls benutzte Alternative dazu sind die Perzentile. Sie sind so definiert, dass oberhalb bzw. unterhalb davon ein bestimmter Prozentsatz der Daten liegt. Beispielsweise liegen oberhalb des oberen 5 % - Perzentils 5 % der Werte, unterhalb des unteren entsprechend ebenfalls 5 % der Werte. (Bei den oberen Perzentilen wird manchmal auch der Prozentsatz der Daten angegeben, die darunter liegen; das obere 5 % - Perzentil ist somit gleichbedeutend mit dem 95 % - Perzentil.)

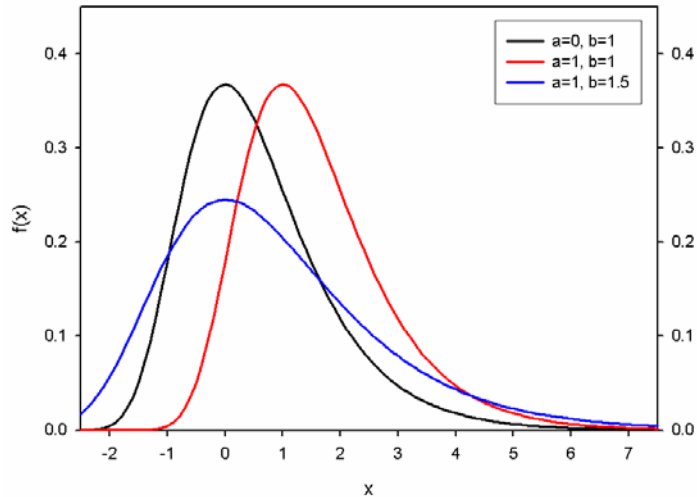


Abbildung 2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) der *Gumbelverteilung* mit verschiedenen Parameterkombinationen (vgl. Text).

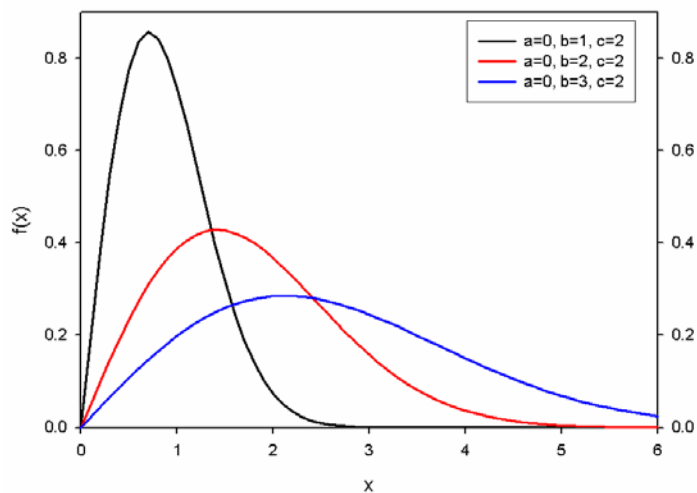


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der *Weibullverteilung* mit verschiedenen Parameterkombinationen (vgl. Text).

Allerdings folgen keinesfalls alle Klimadaten der Normalverteilung; dies ist allenfalls bei der Temperatur relativ häufig der Fall. In der vorliegenden Studie hat es sich gezeigt, dass es ausreicht, noch zwei Alternativen zu nutzen, nämlich die Gumbel-Verteilung, Abb. 2, und die Weibull-Verteilung, Abb. 3. Beide sind unsymmetrisch, wobei die Gumbel-Verteilung wie die Gauß-Verteilung mit zwei Parametern auskommt, nämlich dem Lageparameter a , der in diesem Fall der Modus (häufigster Wert, Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) ist, und dem Streuparameter b . Bei der besonders flexiblen Weibull-Verteilung kommt noch der Formparameter c hinzu und der Lageparameter begrenzt die Verteilung nach unten bei einem x -Minimum (Details siehe Statistik-Standardliteratur, z.B. Schönwiese 2000).

Im folgenden besteht das Ziel der Analyse nun darin, für die bodennahe Lufttemperatur, den Niederschlag und den Wind, wie in Deutschland bzw. Mitteleuropa im letzten Jahrhundert beobachtet, die zeitlichen Veränderungen der empirischen bzw. theoretischen Verteilungen zu bestimmen, um daraus auf entsprechende Veränderungen der Eintrittswahrscheinlichkeit extrem hoher sowie extrem niedriger Werte zu schließen. Da dabei von vornherein kein einheitliches Bild zu erwarten ist, wurden die Analysen jahreszeitlich differenziert durchgeführt und die räumlichen Strukturen der Wahrscheinlichkeitstrends in Kartenform dargestellt.

2 Datengrundlage

Die in dieser Studie verwendete Datenbasis ist aus Tabelle 1 ersichtlich. Es handelt sich um Monats- als auch Tagesdaten der bodennahen Lufttemperatur (Deutschland) und des Niederschlages (Deutschland und angrenzendes Mitteleuropa) für die Zeitspanne 1901-2000 bzw., mit erheblich größerer Stationsdichte, für 1951-2000. Bei der Temperatur standen sowohl Mittel- als auch Minimum- und Maximumwerte zur Verfügung. Im Gegensatz zur Temperatur, wo die Betrachtung auf Deutschland beschränkt blieb, wurde beim Niederschlag die Analyse auch auf das angrenzende Mitteleuropa ausgedehnt, was aufgrund der geringen Repräsentanz dieses Klimatelements sinnvoll ist. Darüber hinaus erfolgte eine Bewertung jüngerer Beispiele von Extremereignissen aus den Jahren 2002 und 2003 (Kap. 5). Die, wie sich heraus stellte, wenig verlässlichen Winddaten beschränken sich ebenfalls auf Deutschland, und zwar in Form der Anzahl der Tage pro Monat mit Windstärke größer als 8 Bft (Beaufort) bzw. Monatsmittel der Windgeschwindigkeit. Die Abbildungen 4 und 5 geben die Stationsdichte der Monats- bzw. Tagesdaten von Temperatur und Niederschlag an.

Tabelle 1: Übersicht über die Zahl der verwendeten Klimazeitreihen (Schwerpunkt Deutschland).

Datentyp	Tagesdaten		Monatsdaten	
	1901-2000	1951-2000	1901-2000	1951-2000
Niederschlag	21	301	133 + 79*	-
Temperatur	3**	141**	6**/12	141**
Wind	-	-	-	15/72***

*) zusätzlich Mitteleuropa ***) Mittel-, Maximum- und Minimumwerte

****) Anzahl der Tage Bft > 8 (15 Stationen) bzw. Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit (72 Stationen)

Anmerkung: Die verwendeten Klimadaten stammen vom Deutschen Wetterdienst bzw. vom dort angesiedelten Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN) und wurden im Rahmen eines gemeinsamen DEKLIM-Projektes (Deutsches Klimaforschungsprogramm, BMBF) freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Ein besonderes Problem, auf das hier nicht näher eingegangen wird, ist immer die Qualität der Daten. Das betrifft sowohl die Messgenauigkeit als auch sog. Inhomogenitätseffekte, die dadurch zustande kommen, dass Messgerätewechsel oder/und Stationsverlegungen den Daten gewisse Änderungen aufprägen, die nicht klimatologisch bedingt sind. Außerdem kommt noch das oben erwähnte Repräsentanzproblem dazu. Eine Diskussion dieser Probleme findet sich bei Schönwiese und Rapp (1997), Rapp und Schönwiese (1996; dort ist auch eine Stationsliste mit Ergebnissen von Homogenitätstests angegeben) sowie Rapp (2000).

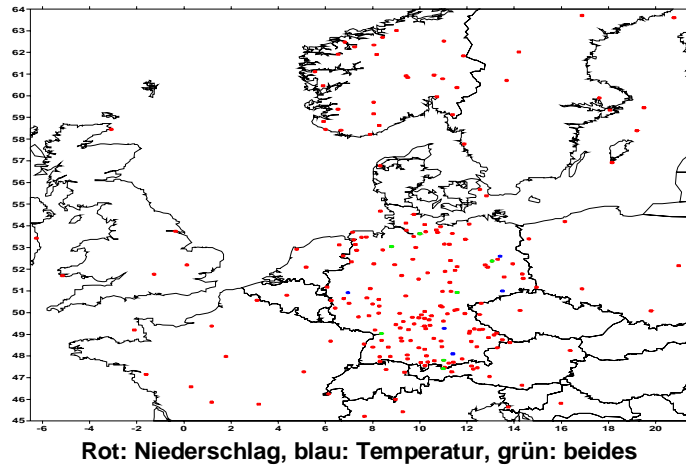


Abbildung 4: Stationsdichte Monatsdaten 1901-2000.

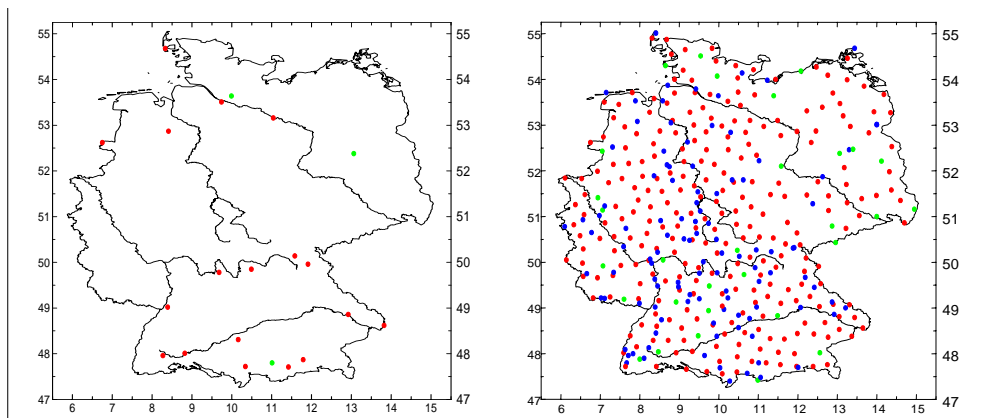


Abbildung 5: Stationsdichte Tagesdaten, links 1901-2000, rechts 1951-2000, Farbkennzeichnungen wie in Abb. 4.

3 Zeitlich gleitende Extremwertanalyse

3.1 Methodik

Zunächst kam die Methodik zur Anwendung, wie sie bisher üblich ist und daher auch vom IPCC (2001) empfohlen worden ist. Dabei liegen alle Daten als Zeitreihen der in Tab. 1 angegebenen Klimatelemente für die ebenfalls dort angegebene Anzahl von Stationen vor. Die Analyse beginnt mit der Bestimmung der empirischen Häufigkeitsverteilung und der Anpassung einer der in Kap. 1 genannten theoretischen Verteilungen mit Test der Anpassungsgüte nach dem Kolmogoroff-Smirnoff- sowie χ^2 -Test. Sodann werden die Schwellen und Fensterbreiten festgelegt. Dabei orientieren sich die Schwellen an den σ -Werten (z.B. $\mu \pm 1\sigma$, $+2\sigma$ und $+3\sigma$ bei den Niederschlagsmonatsdaten; $\mu \pm 1.25\sigma$, ..., 2σ bei den Temperaturtagesdaten) oder Perzentilen (z.B. 95, 98, 99, 99.5 % bei den Niederschlagstagesdaten), im einzelnen in empirischer Optimierung, wobei die unterschiedliche Streuung der Temperatur- und Niederschlagsdaten berücksichtigt ist. Die Fensterbreiten bestimmen den Teil der Zeitreihe, für den jeweils die Berechnungen durchgeführt werden. Dies war jeweils 10 Jahre (120 Monate), so dass z.B. für 1901-2000 zuerst 1901-1910, dann 1902-1911 usw. bis 1991-2000 betrachtet werden (somit jeweils 1 Jahr Zeitverschiebung bei der gleitenden Analyse).

Sodann erfolgt die Berechnung der empirischen bzw. theoretischen Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten hinsichtlich dieser Schwellen für alle Fenster, so dass sich

entsprechende Zeitreihen dieser Wahrscheinlichkeiten ergeben. Daraus lassen sich dann weitergehend die Wartezeitverteilung, Wiederkehrzeitverteilung und das Risiko berechnen. Ist als Erwartungswert der wahrscheinlichste Wert (Modus) einer Verteilung definiert, so versteht man unter der Wartezeit die Zeit, die von einem beliebigen Zeitpunkt t_1 bis zum erstmaligen Eintreten des betrachteten (schwelenorientierten) Ereignisses zum Zeitpunkt t_2 vergeht. Die Wartezeitverteilung gibt folglich die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass man von t_1 bis t_2 warten muss, bis das betrachtete Ereignis erstmalig eintritt. Die Wiederkehrzeit ist der Erwartungswert der Wartezeitverteilung, d.h. die Summe aus allen möglichen Wartezeiten, multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit, dass genau nach dieser Zeit das betrachtete Ereignis erstmalig eintritt. Somit ist die Wiederkehrzeit ein Maß dafür, wie oft ein betrachtetes Ereignis innerhalb der Zeitspanne von t_1 bis t_2 eintritt. Das Risiko ist schließlich die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls das betrachtete Ereignis mindestens einmal auftritt. Zusätzlich wurden Trockenperioden und Niederschlagsereignisse hinsichtlich ihrer Cluster-Bildung untersucht, d.h. betrachtet, wie viele Werte extrem geringen Niederschlags in einem nunmehr variabel definierten Fenster auftreten.

3.2 Ergebnisse

Die vielfältigen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- *Niederschlag, Monatsdaten*

Die Gumbelverteilung ist am besten für die Betrachtung oberer Schranken geeignet; untere Schranken sind wegen der starken positiven Schiefe dieser Verteilung (rascher Abfall in Richtung kleiner x-Werte, vgl. Abb. 2) problematisch. ***Im Westen Deutschlands ist überwiegend ein Trend zu kürzeren Wiederkehrzeiten extrem hoher Werte feststellbar, im Osten dagegen zu längeren. Somit steigt das Risiko dafür im Westen, während es im Osten eher absinkt.*** Einige Details dazu liefert Abb. 6.

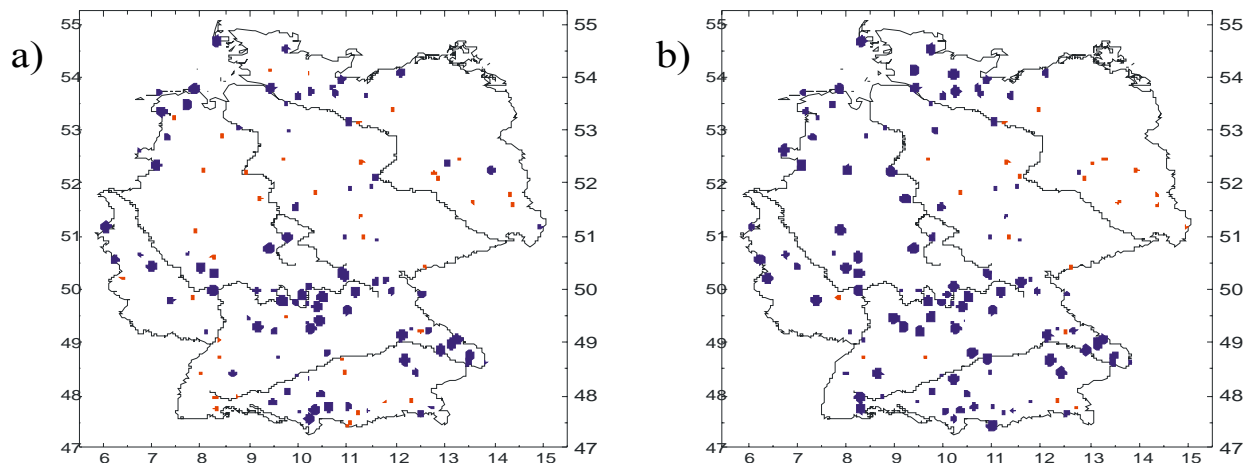


Abbildung 6: Niederschlag, Monatsdaten 1901-2000, Trends der Wiederkehrzeit für das Überschreiten der 2σ -Schranke a) empirisch und b) bei angepasster Gumbelverteilung; rot zunehmend, blau abnehmend (extremer), wobei die Größe der Farbsymbole zur Trendstärke proportional ist.

- *Niederschlag, Tagesdaten*

Die Trends zu mehr bzw. weniger Extremniederschlägen sind bei Tagesdaten sehr viel mehr schwellenabhängig als bei Monatsdaten, so dass sich kein einheitliches Bild ergibt. ***Tendenziell nimmt die Streuung im Winter verbreitet zu, im Sommer dagegen ab, was zu steigenden Wahrscheinlichkeiten insbesondere extrem hoher Winterniederschläge führt (besonders im Westen und Süden Deutschlands).*** Details sind aus Abb. 7 ersichtlich, wobei besonders bemerkenswert ist, dass beim höheren Perzentilwert im Osten und Norden von Deutschland eine

Trendumkehr eintritt. *Was Trockenperioden betrifft, so zeichnet sich im Westen ein Trend zu einem häufigeren Auftreten ab (gesamtes Jahr), während dagegen die maximale Trockenperiodenlänge eher abnimmt.*

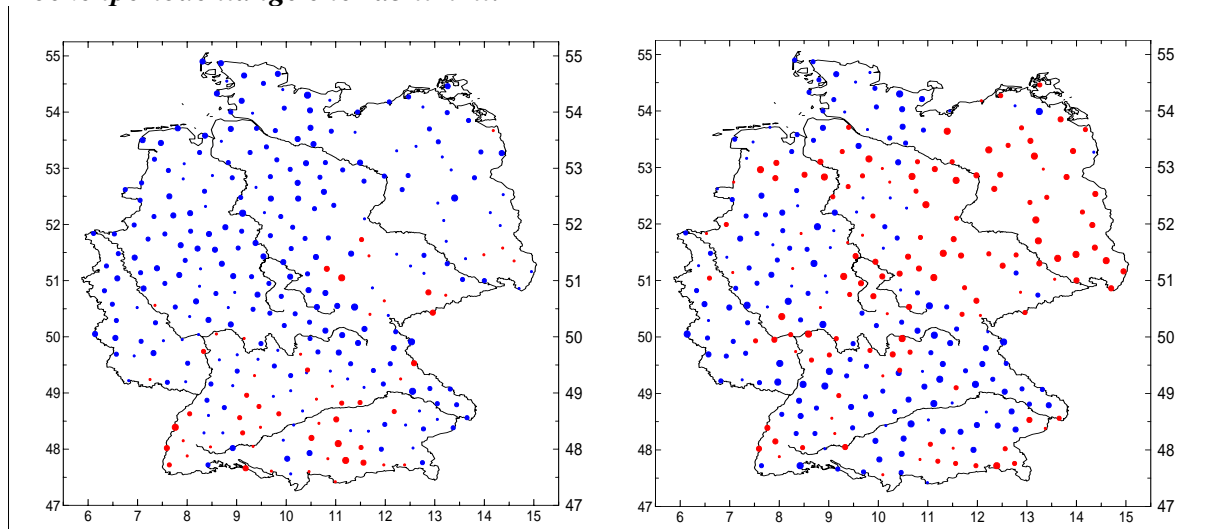


Abbildung 7: Niederschlag, Tagesdaten 1951-2000, Trends der Wiederkehrzeit, links 95%-Perzentil, rechts 99,5%-Perzentil (Überschreitung); rot zunehmend, blau abnehmend (extremer), wobei die Größe der Farbsymbole zur Trendstärke proportional ist.

- *Temperatur, Monatsdaten*

Die Gauß-, zum Teil aber auch die Weibullverteilung sind am besten erfüllt. Eine regionale Differenzierung ist, auch wegen der wenigen verfügbaren Stationen, nicht möglich.

- *Temperatur, Tagesdaten*

Mittel- und Maximumtemperaturen folgen meist der Gumbelverteilung; bei Minimumtemperaturen schlägt eine befriedigende Anpassung einer theoretischen Verteilung fehl. Die Wahrscheinlichkeit für das Unterschreiten unterer Schwellen nimmt deutlicher ab als sie für das Überschreiten oberer Schwellen zunimmt. ***Der auch in Deutschland erkennbare Erwärmungstrend wirkt sich somit mehr auf die Abnahme extrem tiefer Temperaturen als auf die Zunahme extrem hoher Temperaturen aus.***

Eine Analyse der Winddaten wurde mit Hilfe dieser Methodik nicht durchgeführt.

4 Strukturorientierte Zeitreihenzerlegung

4.1 Methodik

Die alternativ angewandte Methodik (nach Trömel, 2005) geht von der Tatsache aus, dass klimatologische Zeitreihen instationär sind; d.h. die statistischen Momente wie Mittelwert (Lageparameter), Varianz (Streuparameter) usw. ändern sich im Laufe der Zeit. Die jeweils betrachtete Zeitreihe wird daher in bestimmte Strukturen zerlegt, soweit sie signifikant in den Daten erkennbar sind. Dies sind linearer oder nicht linearer Trend (falls nicht signifikant, ersetzt durch den Mittelwert), die saisonale Komponente (Jahresgang, dessen Amplitude und Phase ebenfalls zeitlich variabel sein können), weitere zyklische Komponenten (hier nicht näher betrachtet), die sog. niederfrequente („glatte“) Komponente (mit nur wenigen relativen Maxima und Minima) und das Residuum. Mit Hilfe der schrittweisen Regression wird ermittelt, welche Zusammensetzung solcher Strukturen die jeweilige Zeitreihe am besten repräsentiert.

Daraus lassen sich nun auch zeitabhängige Parameterfunktionen der jeweils angepassten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) ermitteln, vgl. Kap. 1, im Fall der Gauß-Verteilung also die Änderung des Mittelwerts (Lageparameters) μ , gleichbedeutend mit dem Trend, und des Streuparameters σ ; im Fall der Gumbelverteilung des Lageparameters a und des Streuparameters b , im Fall der Weibullverteilung kommt noch der Formparameter c hinzu. Wenn dies bekannt ist, lässt sich für jede beliebige Zeit t die PDF angeben sowie die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit für beliebige (obere und untere) Schwellenwerte berechnen.

4.2 Ergebnisse

Auch die mit Hilfe dieser Methodik gewonnenen Ergebnisse sind sehr vielfältig. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen, wobei beim Niederschlag die Aussagen nicht nur für Deutschland, sondern in groben Zügen auch für das angrenzende Mitteleuropa gelten.

- Niederschlag, Monatsdaten

Die Gumbelverteilung erweist sich als am besten geeignet. Auf dieser Basis wurden im Winter hauptsächlich positive Trends sowohl im Lageparameter (d.h. zunehmender Mittelwert) als auch im Streuparameter (d.h. gleichzeitig Zunahme der Varianz) gefunden. ***Dies bedeutet, dass vor allem die Wahrscheinlichkeit extrem hoher Niederschläge angestiegen ist, und dies insbesondere im Winter. Dagegen zeigen sich im Sommer verbreitet negative Trends im Streuparameter, was mit einer Wahrscheinlichkeitsabnahme extrem hoher Niederschläge verbunden ist;*** Beispiele dazu sind aus Abb. 8 ersichtlich.

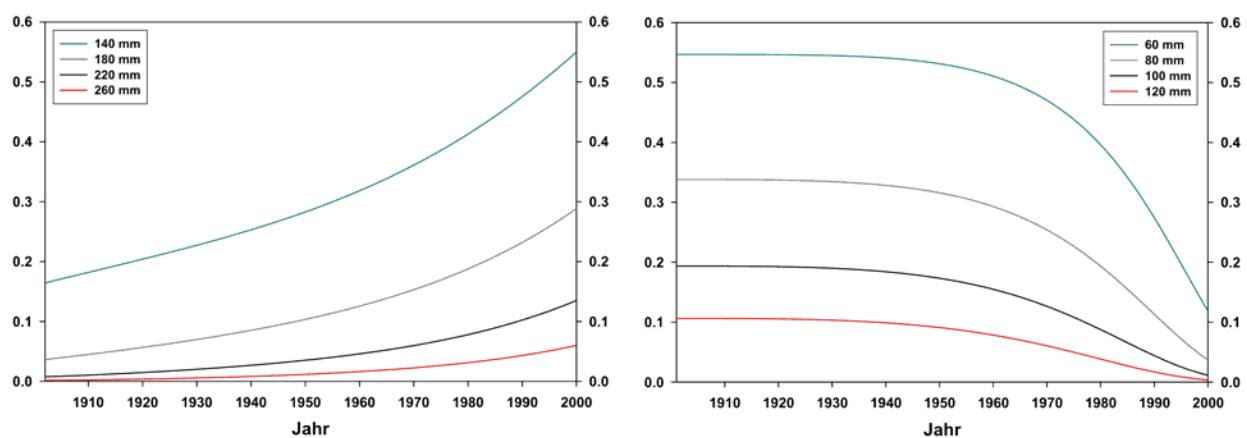


Abbildung 8: Links zeitliche Änderung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der angegebenen Winter-Schwellenwerte des Niederschlags an der Station Mainz, rechts des August-Niederschlags in Kitzingen.

- Niederschlag, Tagesdaten

Diese Daten lassen sich besser durch die Weibullverteilung repräsentieren. ***Dabei nimmt die Anzahl der Tage mit extrem hohen Niederschlagssummen vor allem im Winter und Herbst zu, im Sommer dagegen ab;*** vgl. Abb. 9. Die Zunahme betrifft wahrscheinlich sowohl den relativ kurzzeitigen (konvektiven) Niederschlag (Schauer) als auch länger anhaltende Aufgleitniederschläge (an Warmfronten), ohne dass hier etwas über Häufigkeitsverschiebungen gesagt werden kann. Im Sommer könnte zunehmender Hochdruckeinfluss die Ursache für den Niederschlagsrückgang sein. Für Europa vorliegende Luftdruck-Trendkarten (Schönwiese und Rapp, 1997; Zeitspanne 1891-1990) zeigen nämlich in Mitteleuropa im Frühling und Sommer zunehmende, im Winter dagegen abnehmende Tendenz (im Herbst uneinheitlich).

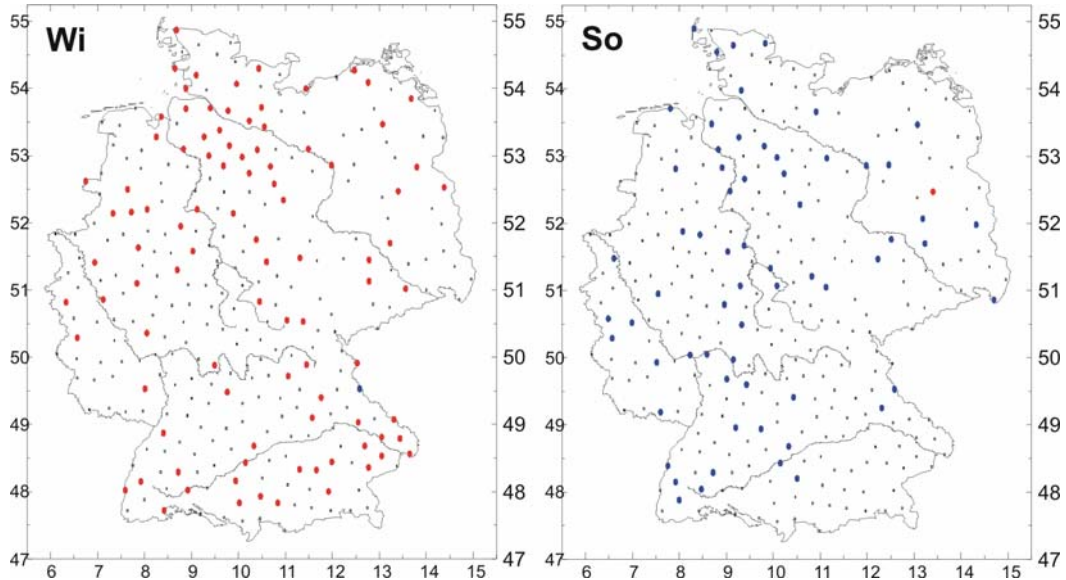


Abbildung 9: Trend der Überschreitungswahrscheinlichkeit des oberen 10%-Perzentils der Tagessummen des Niederschlags (1951-2000); rot signifikant positiv, blau signifikant negativ, schwarz unsignifikant.

- Temperatur, Monatsdaten

Diese Daten folgen in guter Näherung der Gauß-Verteilung. Dabei wurden in allen Jahreszeiten, ausgenommen Herbst 1951-2000, positive Trends im Mittelwert gefunden, aber kaum Änderungen der Varianz. **Dies bedeutet verbreitet zunehmende Wahrscheinlichkeit für warme und in ähnlichem Ausmaß abnehmende Wahrscheinlichkeit für kalte Monate.**

- Temperatur, Tagesdaten

Wie bei den Niederschlagstagesdaten ist die Weibullverteilung heranzuziehen. **Ab etwa 1970 ist dabei eine stark beschleunigte Wahrscheinlichkeitszunahme extrem warmer Tage (vor allem was die Maximumwerte im Winter betrifft) und –abnahme extrem kalter Tage (vor allem in Süddeutschland) zu beobachten;** vgl. Abb. 10.

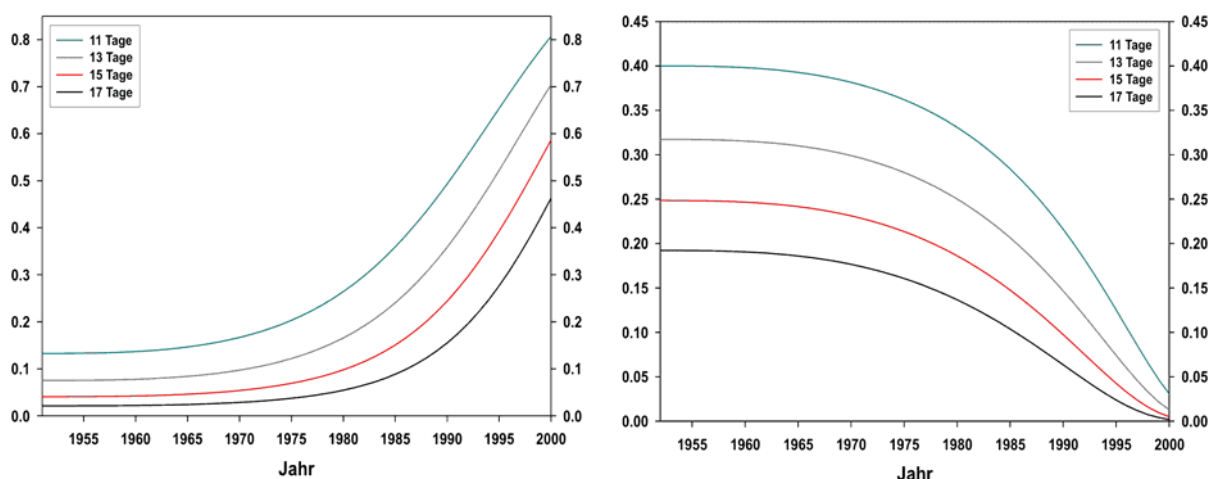


Abbildung 10: Links zeitliche Änderung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der angegebenen Zahl von Tagen mit einer Maximumtemperatur über dem 10%-Perzentil (hier 28,5 °C) an der Station Euskirchen, rechts einer Wintertemperatur unter dem 10%-Perzentil (hier -10,6 °C) an der Station Erlangen.

- Wind

Die Analyse der Winddaten hat kaum zu systematisch interpretierbaren Ergebnissen geführt, was wahrscheinlich mit deren relativ großer Fehlerbelastung, aber auch sehr ausgeprägten zeitlich-räumlichen Variabilität zusammenhängt. So lässt sich nur mit einiger Vorsicht sagen, dass tendenziell die Wahrscheinlichkeit extremer täglicher Maxima ($> \text{Bft } 8$) im Winter zu- (Ausnahme Küstenbereich) und im Sommer abnimmt (Ausnahme Süddeutschland).

5 Fallbeispiele

Als Fallbeispiele seien hier der **Hitzesommer 2003** und das Elbe-Hochwasser vom Sommer 2002 angeführt. Der Sommer 2003 (Mittelwert der Monate Juni, Juli und August) ist in ganz Mitteleuropa extrem heiß und größtenteils auch trocken gewesen, mit Schwerpunkt in Südfrankreich und der Schweiz. **Aber auch in Deutschland ist er seit 1761 mit einem Temperaturwert von $19,6\text{ }^\circ\text{C}$ ohne Beispiel; das ist $3,4\text{ }^\circ\text{C}$ höher als der Mittelwert der Vergleichsperiode 1961-1990** und weicht von diesem Wert um das 3,8-fache der Standardabweichung ab ($3,8\sigma$, entspricht in Abb. 1, schwarze Kurve, $3,8x$). Dieser Wert ist so herausragend, dass er sich allein aus dem langzeitlichen, seit etwa 1900 erkennbaren Erwärmungstrend nicht erklären lässt, zumal die bisherigen Rekordwerte der Sommer 1947, 1983, 1992, 1994 und davor erst wieder 1859, 1834 und 1826 erheblich übertroffen worden sind (Schönwiese et al. 2004); vgl. Abb. 11.

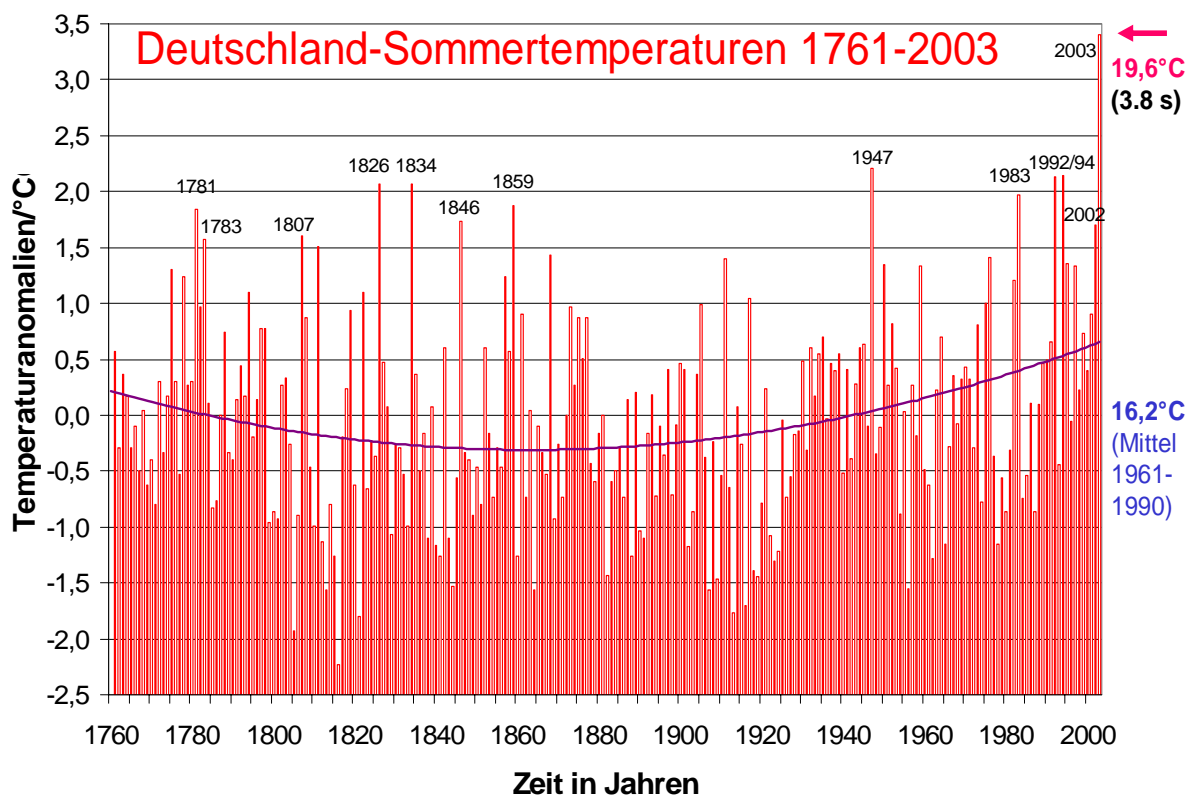


Abbildung 11: Sommertemperatur-Anomalien (Mittel der Monate Juni, Juli und August in Form der Abweichungen vom Mittelwert 1961-1990) 1761-2003, Flächenmittel Deutschland, mit Trendkurve (lila) und Angabe einiger extremer Hitzesommer. Dabei fällt der Rekordwert 2003 besonders auf (Datenquelle: Rapp, 2000, und Deutscher Wetterdienst; Analyse Schönwiese et al., 2004).

Wendet man die in Kap. 4 skizzierte Methode an, so ergibt sich seit etwa 1960/1970 bis 2003 ein Anstieg der Wahrscheinlichkeit für ein derartiges Ereignis (Temperaturanomalie $\geq 3,4\text{ }^\circ\text{C}$) von $p < 0,0001$ (das entspricht einer Jährlichkeit bzw. Wartezeit von über 10 000 Jahren, d.h. im

statistischen Mittel höchstens einmal innerhalb von 10 000 Jahren zu erwarten) auf $p \approx 0,0022$ (Jährlichkeit rund 455 Jahre, d.h. nunmehr im statistischen Mittel einmal innerhalb von 455 Jahren zu erwarten). ***Das ist zwar immer noch als extrem selten einzustufen, bedeutet aber einen Anstieg der Wahrscheinlichkeit um mehr als das 20-fache. Klimamodellrechnungen auf der Grundlage von Szenarien menschlicher Einflussname (anthropogener Treibhauseffekt) lassen erwarten, dass sich dieser dramatische Anstieg der Wahrscheinlichkeit des Eintretens von extremen Hitzesommern in den nächsten Jahrzehnten ähnlich rasch fortsetzen wird*** (Schär et al. 2004). Übrigens war das besondere Kennzeichen des Hitzesommers 2003 nicht nur ein sehr hoher Flächenmittelwert der bodennahen Lufttemperatur in den Sommermonaten, insbesondere im August, sondern auch eine ***bisher einmalig hohe Anzahl von Hitzetagen*** (Tagesmaximum $> 30\text{ °C}$) bzw. extremen Hitzetagen (Tagesmaximum $> 35\text{ °C}$), z.B. in Karlsruhe 53 (bisheriger Rekord im Sommer 1947: 44) bzw. 16 (bisherige Rekordwerte Sommer 1947 und 1952 mit 9 bzw. 10).

Ganz anders ist die Situation, was das Hochwasser des Sommers 2002 in der Elbe-Region betrifft (DWD 2003). Zwar sind dabei, im Rahmen der dokumentierten Messungen, neue Niederschlagsrekorde aufgetreten (allen voran Station Zinnwald-Georgenfeld im Erzgebirge mit 312 mm am 12.8.2002; Rekord zuvor 260 mm am 7.7.1954 in Stein bei Rosenheim, Bayern und am 6.7. 1906 in Zeithain, Sachsen). Pegel- und Abflusszeitreihen zeigen jedoch z.B. für die Elbe in Dresden einen deutlich abnehmenden Trend (seit ca. 1860, aber auch längerzeitlich; Mudelsee et al., 2003). Andererseits zeigt der Pegel Köln am Rhein – wenn auch unter erheblichen Fluktuationen – einen ansteigenden Trend. Differenziert man darüber hinaus noch jahreszeitlich, so lässt sich das mit zunehmendem Niederschlag im Winter (Schwerpunkt Westen und Süden Deutschlands) und Niederschlagsabnahme im Sommer (u.a. im Osten) in Verbindung bringen.

6 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie zeigt, dass mit den beobachteten Klimaänderungen des Industriezeitalters, die meist in Form relativ langfristiger Trends beschrieben werden, auch Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen verbunden sind. Die detaillierten Wahrscheinlichkeitsberechnungen zeigen aber auch – hier für Deutschland und im Fall des Niederschlags auch für das angrenzende Mitteleuropa betrachtet – dass deutliche jahreszeitliche Unterschiede und regionale Strukturen auftreten. Eine generelle Aussage derart, dass das Klima in Deutschland allgemein extremer geworden sei, ist somit nicht angebracht. Vielmehr müssen die Details beachtet werden.

Bei der Temperatur ist vor allem der Erwärmungstrend, im wesentlichen ohne gleichzeitige Zunahme der Varianz, auffällig. Das heißt, ***obwohl in den letzten Jahrzehnten der Herbst davon ausgenommen zu sein scheint, ist vor dem Hintergrund anthropogener Klimaänderungen mit einem weiteren Erwärmungstrend in allen Jahreszeiten zu rechnen, der mit einer Wahrscheinlichkeitszunahme extrem heißer Tage und entsprechenden Abnahme extrem kalter Tage Hand in Hand geht.***

Beim Niederschlag muss die Bewertung noch wesentlich differenzierter ausfallen, auch wenn in diesem Fall nicht nur Trends, sondern häufig auch Zunahmen der Varianz erkennbar sind, somit eine Tendenz zu einem wirklich extremeren Klima. ***Winterliche Starkniederschläge und Sommertrockenheit, beides mit zunehmender Tendenz, sind hier die größten Risiken.*** An solchen Befunden der statistischen Klimadatenanalyse der Vergangenheit müssen sich im übrigen die Klimamodellprojektionen in die Zukunft messen lassen, wenn man davon ausgeht,

dass das anthropogene Klimasignal schon in den Beobachtungsdaten des Industriezeitalters enthalten ist.

Literatur (Auswahl)

DWD (Deutscher Wetterdienst). Klimastatusbericht 2002. Selbstverlag, Offenbach, 2003.

J. Grieser, T. Staeger und C.-D. Schönwiese. Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes (UBA-Forschungsvorhaben 207 41 132). Bericht Nr. 103, Inst. Meteorol. Geophys., Univ. Frankfurt/Main, 2000.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, J.T. Houghton et al., eds.). Climate Change 2001. The Scientific Basis. Univ. Press, Cambridge, 2001.

IPCC. Workshop on Changes in Extreme Weather and Climate Events. Unpublished Report, Geneva, 2002.

M. Mudelsee et al. No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. *Nature*, 425: 166-168, 2003.

J. Rapp. Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer ZTrendanalysen für Europa und Deutschland. Bericht Nr. 212, DWD, Selbstverlag, Offenbach, 2000.

J. Rapp und C.-D. Schönwiese. Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowiss. Arb., Serie B, Band 5, Selbstverlag, FB Geowiss. Univ. Frankfurt/Main, 2. Aufl. 1996.

C. Schär et al. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427: 332-336 (2004).

C.-D. Schönwiese. Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Borntraeger, Stuttgart, 3. Aufl. 2000.

C.-D. Schönwiese. Klimatologie. Ulmer (UTB), Stuttgart, 2. Aufl. 2003.

C.-D. Schönwiese and J. Rapp. Climate Trend Atlas of Europe – Based on Observations 1891-2000. Kluwer, Dordrecht, 1997.

C.-D. Schönwiese, T. Staeger and S. Trömel. The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. *Meteorol. Z.*, 13: 323-327 (2004); siehe auch DWD. Klimastatusbericht 2003. Selbstverlag, Offenbach, 2004.

S. Trömel. Statistische Modellierung von Klimazeitreihen. Dissertation und Bericht Nr. 2, Inst. Atmosphäre Umwelt, Univ. Frankfurt/Main, 2005.

Anhang: Erklärung einiger Fachbegriffe

Cluster	Konzentrierung relativ vieler Daten, meist mit Blick auf → Extremwerte, innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls (hat hier nichts mit der statistischen Methodik der Clusteranalyse zu tun)
Eintrittswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit, dass im Rahmen einer → PDF Daten innerhalb eines bestimmten Werteintervalls auftreten
Erwartungswert	häufigster (→ Modus) bzw. wahrscheinlichster Wert eines Datenkollektivs
Extremwert	Daten wert, der relativ weit oberhalb bzw. unterhalb des → Mittelwertes bzw. → Modus liegt
Extremereignis	Konstellation (statistisch oder klimatologisch), die zum Auftreten von einem oder mehreren → Extremwerten innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls führt
Häufigkeitsverteilung	Häufigkeit der auftretenden Daten in Abhängigkeit von ihrem Wert
Jährlichkeit	Anzahl der Jahre, nach denen im Mittel aufgrund einer bestimmten statistischen Wahrscheinlichkeit bestimmte Daten (z.B. → Extremwerte) zu erwarten sind
Jahrhundertereignis	Datenwert (z.B. → Extremwert) mit einer → Jährlichkeit von 100 Jahren
Jahrzehntereignis	Datenwert (z.B. → Extremwert) mit einer → Jährlichkeit von 10 Jahren
Lageparameter	kennzeichnender Wert einer → Häufigkeitsverteilung, der die Lage dieser Verteilung hinsichtlich des Koordinatensystems angibt (z.B. → Mittelwert oder → Modus)
Mittelwert	übliche arithmetische Mittelung von Daten (Summierung und Division durch Anzahl)
Modus	häufigster Wert eines Datenkollektivs
Perzentil	Datenwert einer → Häufigkeitsverteilung, oberhalb bzw. unterhalb von dem ein bestimmter Prozentsatz der Daten zu finden ist (z.B. liegen oberhalb des oberen 10%-Perzentils noch 10 % der Daten)
PDF	Abkürzung der engl. Bezeichnung für → Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function)
Residuum	Daten, die von einem Datenkollektiv (z.B. einer → Zeitreihe) verbleiben, wenn bestimmte Strukturen, z.B. ein Trend, davon extrahiert worden sind
Risiko	Wahrscheinlichkeit dafür, dass innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls ein bestimmter Datenwert (z.B. → Extremwert) mindestens einmal auftritt
Standardabweichung	Wurzel aus der Varianz (Streuungsmaß)
Überschreitungswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit, dass im Rahmen einer → PDF Daten oberhalb eines bestimmten Schwellenwerts auftreten
Unterschreitungswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit, dass im Rahmen einer → PDF Daten unterhalb eines bestimmten Schwellenwerts auftreten
Varianz	Summe der Abweichungsquadrate vom → Mittelwert, dividiert durch die Anzahl der Daten minus 1
Wahrscheinlichkeitsdichte-	normierte Häufigkeitsverteilung, so dass das bestimmte

funktion	Integral über alle Werte gleich 1 (100 %) ist; gibt an mit welcher Wahrscheinlichkeit bestimmte Datenwerte zu erwarten sind
Wartezeit	Zeit, die von einem beliebigen Zeitpunkt bis zum erstmaligen Auftreten eines bestimmten Datenwertes (z.B. → Extremwert) vergeht
Wiederkehrzeit	Summe aus allen möglichen → Wartezeiten im Rahmen einer → PDF, multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit, dass genau nach dieser Zeit ein bestimmter Datenwert (z.B. → Extremwert) auftritt
Zeitreihe	Daten, die in bestimmten Zeitabständen vorliegen bzw. Mittelwerte für bestimmte aufeinander folgende Zeitintervalle (z.B. monatlich, jährlich usw.)
Zufallsvariable	Größe (hier Messgröße), die nach zunächst unbekanntem Gesetzmäßigkeiten unterschiedliche Zahlenwerte annehmen kann