

C.-D. SCHÖNWIESE

9 Extremereignisse aus meteorologisch-statistischer Sicht

Meteorological-statistical perspectives of extreme events

Zusammenfassung

Nach einigen Beispielen meteorologischer Extremereignisse in verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen wird die Methodik der hier verwendeten Extremwertstatistik umrissen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die **Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF)** der jeweils betrachteten Daten, die nach einer neuen Methode über die Zeitfunktionen ihrer Parameter in ihrem zeitlichen Verlauf berechnet werden kann. Daraus lassen sich dann die Zeitfunktionen der Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeit bestimmter extremer Schwellenwerte berechnen. Ausgewählte Fallstudien zeigen die daraus resultierenden Ergebnisse für extreme Temperatur und extremen Niederschlag in Deutschland. Die Schlussfolgerungen beziehen auch eine Aussagen zum Wind mit ein.

Abstract

After some examples of meteorological extreme events in different scales of time and space the method of extreme value statistical analysis applied here is outlined. Thereby, a central point is the **probability density function (PDF)** of the data considered which can be innovatively computed in its time history based on the time functions of the PDF parameters. In turn, the time functions of the probability of exceeding or remaining below defined extreme thresholds become available. Some selected case studies reveal the related results concerning extreme temperature or precipitation, respectively, in Germany. The conclusions imply also some statements with respect to wind.

1 Einführung

Meteorologische Extremereignisse können in sehr unterschiedlichen zeitlichen bzw. räumlichen Skalen auftreten. Beispiele dafür sind: extrem hohe bzw. extrem tiefe Temperaturwerte, beruhend auf Einzelmessungen zu einer bestimmten Zeit an einer bestimmten Station (in Deutschland Rekordwert mit 40,2 °C, gemessen am 27.07.1983 in Gärnersdorf bei Amberg sowie am 09.08.2003 in Karlsruhe und am 13.08.2003 in Karlsruhe und Freiburg); extrem hohe tägliche Niederschlagssummen (in Deutschland Rekordwert mit 312 mm gemessen am 12.08.2002 in Zinnwald/Erzgebirge; vgl. Beitrag 7, RUDOLF und MALITZ, in diesem Heft); extrem hohe Windgeschwindigkeiten wie sie z. B. der Orkan Kyrill in der Zeit 18.-20.01.2007 in West- und Mitteleuropa bewirkt hat; Hitze- und Dürresommer (Juni-August) wie das 2003 in großen Teilen Mittel-, West- und Südeuropas der Fall war (im Flächenmittel Deutschland Anomalie von 3,4 K gegenüber dem CLINO-Mittelwert 1961-1990 von 16,2 °C, Rekordwert seit Messbeginn 1761; SCHÖNWIESE et al. 2004); relativ hohes Temperaturniveau der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur, vergleiche Abb. 9-1, wobei diese 1850 beginnende Datenreihe die 14 wärmsten Jahre (Anomalien von > 0,2 K gegenüber dem CLINO-Mittelwert 1961-1990) in

der Zeit 1990-2007 zeigt (CRU 2008; vgl. auch wiederum Beitrag 7 in diesem Heft, RUDOLF und MALITZ). Dabei kommen die Aussagen über Zeitspannen von mehreren Tagen bzw. Monaten (Witterung) und weitergehend von mehreren bis sehr vielen Jahren (Klima) durch die entsprechend langzeitliche Statistik der Wetterereignisse zustande.

Solche Extremereignisse haben Auswirkungen, beispielsweise Hochwasser aufgrund von Starkniederschlägen, und als Konsequenz davon ggf. Todesfälle und

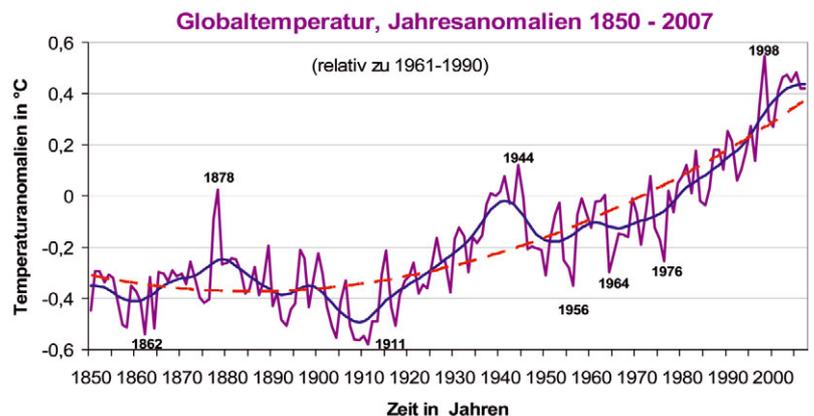


Abb. 9-1: Jahresanomalien 1850-2007 (relativ zu 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur mit 20-jähriger Tiefpassfilterung (blau) und polynomialem Trend (rot gestrichelt). Dieser Trend hat zum Auftreten der wärmsten Jahre (Anomalien > 0,2 K) seit 1990 geführt (Maximum 1998, Anomalie + 0,55 K; Minimum 1911, Anomalie 0,58 K; Datenquelle: CRU 2008, vgl. auch IPCC 2007).

volkswirtschaftliche Schäden, so dass das Risiko dafür i.a. als das Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Extremereignisses und dem Schadenspotential definiert wird. Aus dieser Sicht können Extremereignisse als relativ seltene Phänomene, verbunden mit einem relativ hohen Schaden, aufgefasst werden. Bereits Hochwasser ist aber nicht nur von meteorologischen Bedingungen (Starkniederschlägen, siehe Beitrag 7, RUDOLF und MALITZ, in diesem Heft) abhängig, sondern u. a. auch von Baumaßnahmen im Fluss-Bereich (z. B. Kanalisierung) und Umfeld (z.B. Bodenversiegelung durch Bebauung) abhängig. Das gilt in noch höherem Maß für die Todesfälle und volkswirtschaftlichen Schäden, bei denen u. a. (sich ändernde!) Bevölkerungsdichten und Wertkonzentrationen eine wesentliche Rolle spielen (siehe Beitrag 1, BERZ, in diesem Heft). Daher ist es sinnvoll, das Problem der Extremereignisse nicht nur aus der Versicherungsperspektive, sondern auch aus rein meteorologischer Sicht zu behandeln und darauf basierend statistische Erkenntnisse über deren Eintrittswahrscheinlichkeit abzuleiten.

2 Extremwertstatistik

Zur statistischen Analyse meteorologischer Extremereignisse führt primär die Häufigkeitsverteilung der entsprechenden Daten, die die ursprünglich erfassten Messdaten, aber auch – insbesondere unter klimatologischen Gesichtspunkten – zeitliche bzw. zeitlich-räumliche Mittelwerte sein können. Um von den Zufälligkeiten der Stichprobenerfassung möglichst unabhängig zu sein, ist es üblich, an die zunächst empirische Häufigkeitsverteilung eine theoretische Verteilung in normierter Form anzupassen (siehe z.B. SCHÖNWIESE 2006). Dabei kann es sich bei der theoretischen Verteilung um die Normal- aber auch irgendeine andere Verteilung handeln (was unten näher ausgeführt wird) und Normierung bedeutet eine Version, bei der das bestimmte Integral über den theoretisch möglichen Wertebereich gleich 1 bzw. 100 % ist. In dieser Form spricht man von der **Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion WDF** (engl. probability density function, PDF).

Interessant ist nun, wiederum unter Klima-Aspekten und insbesondere im Zusammenhang mit dem Klimawandel, ob sich solche WDFs zeitlich ändern. In Abb. 9-2 sind daher anhand der Normal-

verteilung und orientiert am Beispiel Temperatur die drei prinzipiell möglichen Fälle schematisch dargestellt: (a) Die WDF kann sich ohne Veränderung von Streuung und Form in Richtung eines höheren oder auch geringeren Mittelwerts verschieben. (b) Stattdessen kann

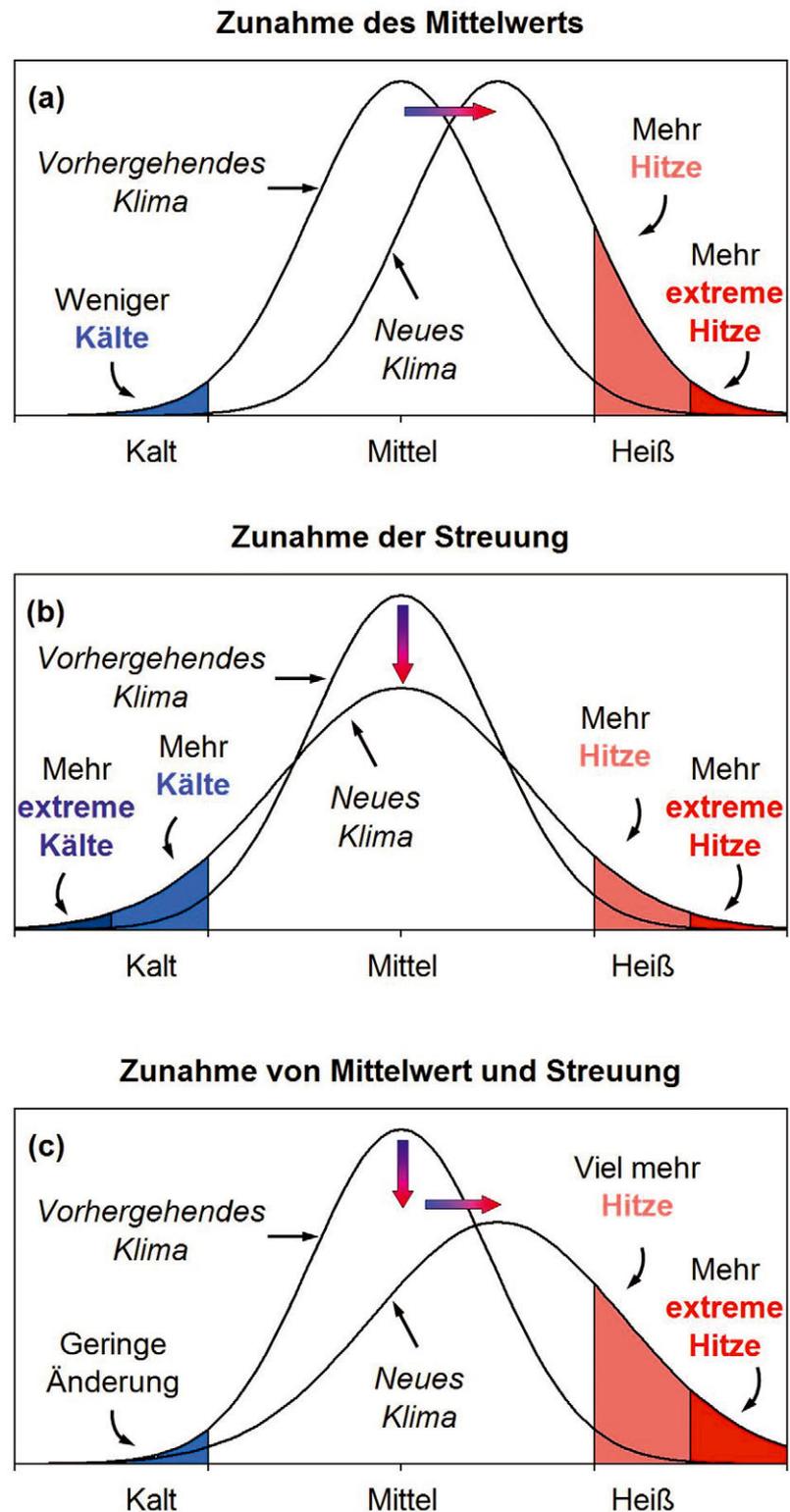


Abb. 9-2: Mögliche zeitliche Veränderungen der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Auswirkungen auf das Eintreten von Extremwerten (nach HUPFER und BÖRNGEN 2004 in Anlehnung an IPCC).

auch nur die Streuung (exakter: Standardabweichung) zu- oder abnehmen. (c) Beides kann sich überlagern. Von diesen Möglichkeiten hängt entscheidend die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit für Extremwerte ab. Dazu muss allerdings zuvor definiert werden, ab welcher Werteschwelle von „extrem“ gesprochen werden soll. Üblich sind Abstände der doppelten oder dreifachen Standardabweichung vom Mittelwert (sogenannte 2σ - oder 3σ -Grenzen) oder Perzentile, z. B. das 5 %-Perzentil, das die unteren 5 % des Datenkollektivs umfasst oder das 95 %-Perzentil (auch oberes 5 %-Perzentil genannt), für die oberen 5 % des Datenkollektivs.

Die in Abb. 9-2 farblich markierten Bereiche sind nun ein Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Werten unterhalb bzw. oberhalb solcher Schwellen, somit die Extremwert-Eintrittswahrscheinlichkeit, auch Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit $p(U)$ bzw. $p(\bar{U})$ genannt. Man erkennt in dieser Abbildung, dass im Fall (a), falls der Mittelwert zunimmt, $p(U)$ ab- („weniger Kälte“) und $p(\bar{U})$ zunimmt (mehr Hitze, zusätzlich mehr extreme Hitze). Im Fall (b) nehmen sowohl $p(U)$ als auch $p(\bar{U})$ zu (bzw. beim nicht dargestellten Fall abnehmender Streuung ab) und im Fall (c) sind die Änderungen von $p(U)$ und $p(\bar{U})$ quantitativ unterschiedlich. Diese schematischen Betrachtungen sollen im folgenden anhand konkreter Beispiele mit Leben gefüllt werden.

Dabei wird jedoch nicht so vorgegangen, dass WDFs für unterschiedliche Zeitintervalle, eventuell auch übergreifend, berechnet werden. Vielmehr wird die von TRÖMEL (2005) entwickelte Methode verwendet (Kurzinformation siehe z. B. SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2006). Sie erlaubt es, für alle Parameter einer beliebigen WDF (Lage-, Streu- und ggf. Formparameter; siehe Lehrbücher der Statistik, z. B. SCHÖNWIESE 2006) Zeitfunktionen zu berechnen (ähnlich

wie in Abb. 9-1 die Regressionsfunktion, zu interpretieren als Änderung des Lageparameters, für jeden beliebigen Zeitpunkt einen Regressionswert liefert), so dass folglich für beliebige Zeiten, hier Jahre, nicht nur die WDF, sondern für beliebige Schwellen auch $p(U)$ und $p(\bar{U})$ angegeben werden können. Somit ist der zeitliche Verlauf der Änderung der Extremwert-Eintrittswahrscheinlichkeit abschätzbar. Diese Methode hat gegenüber der üblichen Extremwertstatistik, bei der nur die wie auch immer definierten Extremwerte in die Analyse eingehen (z. B. anhand entsprechender Extremwert-Verteilungen), dass die statistischen Aussagen stets auf allen verfügbaren Daten beruhen und damit deren Signifikanz entscheidend erhöht wird.

3 Fallstudie 1: Temperatur in Deutschland

Entsprechende Analysen der Beobachtungsdaten zeigen nun, dass die anhand von Abb. 9-2 schematisch vorgestellten Betrachtungen Realität sind. Als Beispiel sei die August-Mitteltemperatur in Frankfurt/Main gewählt, siehe Abb. 9-3 (links), wo offenbar der in Abb. 9-2 (a) skizzierte Fall eingetreten ist: Die WDF hat sich in Richtung höherer Werte verschoben, ohne signifikante Veränderung der weiteren WDF-Parameter. Was das für das Eintreten extremer Werte bedeutet, lässt sich nun exakt berechnen. Definiert man Datenwerte $\leq 17^\circ\text{C}$ als extrem kalt und $\geq 22^\circ\text{C}$ als extrem warm, so hat sich offenbar zwischen 1901 und 2006 die Unterschreitungswahrscheinlichkeit (für extreme Kälte) $p(U)$ von 21,6 % auf 0,3 % verringert (vgl. farblich markierte Flächenanteile auf der linken Seite der Grafik) und die Überschreitungswahrscheinlichkeit $p(\bar{U})$ (für extreme Wärme) von 0,1 % auf 16,2 % erhöht (Farblich markierte Flächen rechts). Solche Ergebnisse führen das Faktum des Klimawandels offenbar noch viel drastischer vor Augen als die üblichen Trendberechnungen für den Mittelwert.

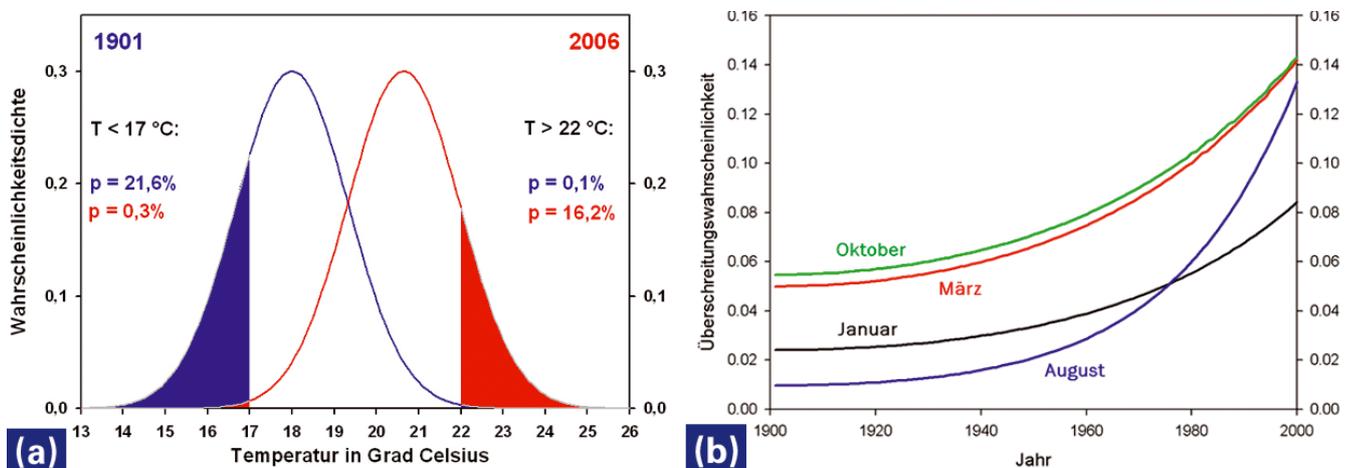


Abb. 9-3: Links WDF-Verschiebung 1901-2006 im Fall der August-Mitteltemperatur Frankfurt/Main und Auswirkungen auf die Extremwert-Eintrittswahrscheinlichkeit für Werte $\leq 17^\circ\text{C}$ bzw. $\geq 22^\circ\text{C}$. Rechts Zunahme der 95%-Perzentil-Überschreitungswahrscheinlichkeit in ausgewählten Monaten in Zeitreihenform (nach BECK et al. 2007, ergänzt nach STAEGGER, pers. Mitt.).

Es fehlt nun aber noch ein weiterer wichtiger Befund: Die WDF-„Verschiebung“ erfolgt nämlich in aller Regel systematisch, d.h. zumindest im letzten Jahrhundert stets in eine Richtung, wenn auch mit variabler „Geschwindigkeit“. Dies und einige monatliche Unterschiede sind aus Abb. 9-3, rechts, ersichtlich, wiederum für das Beispiel Frankfurt/Main, aber für die Überschreitungswahrscheinlichkeit des 95%-Perzentilwertes. Man erkennt dort, dass die Änderung im August besonders markant ist. Dabei lassen sich die Wahrscheinlichkeiten in sog. Jährlichkeiten umrechnen, die angeben, wie oft – im statistischen Mittel! – die entsprechenden Datenwerte zu erwarten sind. Im August beträgt diese Jährlichkeit 1901 rund 100 Jahre, im Jahr 2000 aber nur noch 7 bis 8 Jahre. Auch das verdeutlicht noch einmal die Brisanz, mit der sich der Klimawandel in den Extremwerten äußert. Bei den anderen in dieser Abbildung erfassten Monaten ist diese Änderung nicht ganz so drastisch, aber immer noch deutlich genug. Eine Analyse für ganz Deutschland erbringt qualitativ, zumindest für monatliche, jahreszeitliche und jährliche Daten, weitgehend ähnliche Ergebnisse (BECK et al. 2007). Bei Tagesdaten, auf die hier nicht eingegangen werden soll, ist der Sachverhalt jedoch meist komplizierter (siehe z.B. JONAS et al. 2005, STAEGER et al. 2006), wobei keinesfalls immer von einer Normalverteilung ausgegangen werden darf.

4 Fallstudie 2: Niederschlag Deutschland

Der Niederschlag verhält sich sehr viel komplizierter, wobei hier wiederum nur die Gegebenheiten in Deutschland betrachtet werden sollen. Abgesehen von der im Vergleich zur Temperatur deutlich größeren Messfehlerbelastung und weitaus geringeren räumlichen Repräsentanz folgt der Niederschlag asymmetrischen Häufigkeitsverteilungen. Als Beispiel sei die Station Eppenrod (in der Nähe von Limburg) ausgewählt, und dabei die Niederschlagssummen für den Winter; siehe Abb. 9-4, links. An diese Daten ist ei-

ne Gumbel-Verteilung angepasst, die sich in der Zeit 1901-2000 etwas nach rechts verschoben hat (das heißt Zunahme des Mittelwerts, somit Trend zu mehr Niederschlag), gleichzeitig aber „breiter“ geworden ist (Zunahme der Standardabweichung). Das wirkt sich auf die Extremwertwahrscheinlichkeit wie folgt aus: Definiert man einen Winterniederschlag von 100 mm als extrem niederschlagsarm und von 300 mm als extrem niederschlagsreich, so haben beide Wahrscheinlichkeiten 1901-2003 zugenommen, und $p(U)$ zwar von 0,8 % auf 3,7 % (Unterschreitungswahrscheinlichkeit für extrem wenig Niederschlag) bzw. $p(\bar{U})$ von 1,1 % auf 24,6 % (Überschreitungswahrscheinlichkeit für extrem viel Niederschlag).

Auch hierfür soll für einige ausgewählte Monate die Systematik des Klimawandels hinsichtlich Extremereignissen aufgezeigt werden, siehe Abb. 9-4, rechts: Im Wintermonat Januar wie auch in den Monaten März und November der Übergangsjahreszeiten ist die Neigung zu extrem viel Niederschlag angestiegen, nicht dagegen in den Sommermonaten Juli und August. Bei der gleichen Monatsauswahl zeigen sich bei der Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Tendenz der Neigung zu extrem wenig Niederschlag; Abbildung hier nicht gezeigt) Zunahmen wiederum im Januar und März, in den anderen Monaten dagegen eine Abnahme (siehe SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2006).

Eine umfassende Analyse für alle Monate und viele Stationen weist auf sehr unterschiedliche Gegebenheiten hin, so dass im Grunde jeder Monat und jede Station separat zu bewerten sind. Am einheitlichsten ist noch die zunehmende Neigung zu extrem viel Niederschlag in den Wintermonaten, in Süddeutschland zum Teil aber auch in den Sommermonaten, was hinsichtlich der Überschwemmungsgefahr ein wichtiger Befund ist. Da gleichzeitig eine Tendenz zu häufigeren Hitzesommern besteht und diese aus Gründen der atmosphärischen Zirkulation (Hochdruckeinfluss) zumeist sehr trocken sind, ist auch in sommerlichen Dürreperioden ein be-

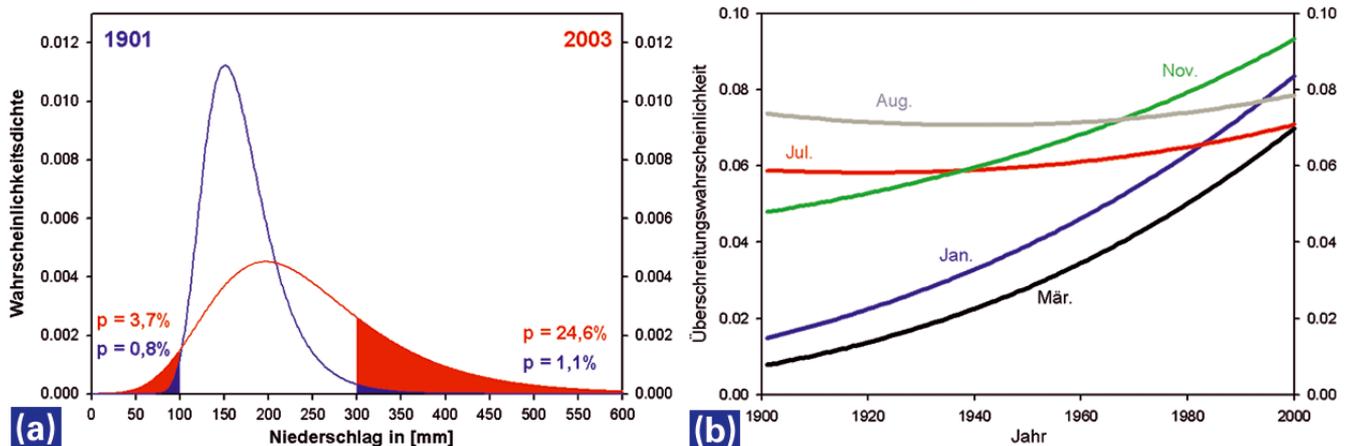


Abb. 9-4: Ähnlich Abb. 9-3, jedoch Winterniederschlag (links; Anpassung einer Gumbel-Verteilung) bzw. Niederschlag in ausgewählten Monaten (rechts), Station Eppenrod (50,4° N 8,0° O) bei Limburg (nach SCHÖNWIESE et al. 2006, sowie SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2006).

achtlich zunehmendes Risiko zu sehen (Details hierzu siehe wiederum TRÖMEL 2005, SCHÖNWIESE und TRÖMEL 2006, BECK et al. 2007).

5 Schlussbemerkungen

Die Frage, ob das Wetter bzw. Witterung und Klima extremer werden, lässt sich aus meteorologisch-statistischer Sicht nicht einheitlich beantworten. Vielmehr ist nach Messgröße, Klimaelement, Monat bzw. Jahreszeit und Region zu differenzieren. Für Deutschland ergibt sich für die Temperatur recht systematisch eine Zunahme extrem warmer auf Kosten extrem kalter Ereignisse. Milde Winter und Hitzesommer sind somit häufiger und ausgeprägter geworden, obwohl es, wie bei allen Trends, auch überlagerte Fluktuationen gibt. Die Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten lassen sich somit nicht auf Einzelsituationen beziehen, sondern gelten vielmehr statistisch für ein relativ großes Datenkollektiv.

Beim Niederschlag (vgl. dazu Beitrag 3, MÜLLER und BISTRY, sowie Beitrag 7, RUDOLF und MALITZ, in diesem Heft) ist die Situation wegen der regionalen und jahreszeitlichen Besonderheiten weit aus komplizierter. Trotzdem ist ein Trend zu mehr Starkniederschlag im Winter und in den Übergangsjahreszeiten erkennbar, in Süddeutschland (regional enger begrenzt) auch im Sommer, während ansonsten der Sommer – verbunden mit häufigerer Hitze – eher zu mehr Dürre neigt. Ähnliches gilt auch für viele andere Regionen der Erde (IPCC 2007).

Beim Wind (vergleiche Beitrag 5, BEDACHT et al., und Beitrag 8, ROSENHAGEN, in diesem Heft) ist in Deutschland kein eindeutiger Trend nachweisbar; vielmehr dominieren die Fluktuationen, die im übrigen auch beim Niederschlag eine größere Rolle spielen als bei der Temperatur. Es ist sogar möglich, dass als Folge der meridional unterschiedlichen Erwärmung der meridionale Luftdruckgradient in der gemäßigten Klimazone abnimmt (das Verhalten des geostrophischen Windes in der Deutschen Bucht weist darauf hin; ROSENHAGEN, dieses Heft). Auch eine polwärtige Verlagerung der Sturmbahnen wird für möglich gehalten (IPCC 2007).

Bei ganz besonders extremen Windereignissen wie Tornados ist zumindest in Deutschland, aber vermutlich auch darüber hinaus, ebenfalls kein eindeutiger Trend nachweisbar, auch wenn die in jüngerer Zeit häufiger beobachtet bzw. beachtet werden (DOTZEK 2005). Bei den tropischen Wirbelstürmen ist vor allem eine Häufigkeitsverlagerung in Richtung intensiverer auf Kosten schwächerer auffällig (WEBSTER et al 2005, IPCC 2007), die Frage einer generellen Tendenz aber noch in der Diskussion.

Insgesamt sind Extremereignisse ein wichtiges meteorologisches Problem, wobei vor allem die dafür verant-

wortlichen physikalisch-synoptischen Prozesse und die hier behandelten statistischen Analysen von Interesse sind. Klimamodelle sind bei kleinräumigen Phänomenen wie Starkniederschlägen oder Tornados im Allgemeinen überfordert und liefern daher am ehesten noch belastbare Aussagen über großräumige Temperaturgegebenheiten wie z. B. Hitzesommer (z. B. SCHÄR et al. 2003). Zweifellos führen Extremereignisse aber auch zu ökonomischen und sozialen Folgen wie volkswirtschaftlichen Schäden und ggf. Todesfällen und gerade diese Folgen sind es, die uns betreffen machen und worauf die große Beachtung der Extremereignisse in der Öffentlichkeit beruht. Die Meteorologie bzw. Klimatologie und die Versicherungswirtschaft sind gefordert, sich der Problematik der Extremereignisse kooperativ zu stellen.

Literatur

- BECK, C., B. RUDOLF, C.-D. SCHÖNWIESE, T. STAEGER, S. TRÖMEL, 2007: Entwicklung einer Beobachtungsdatengrundlage für DEKLIM und statistische Analyse der Klimavariabilität. *Bericht Nr. 6*, Inst. Atmosph. Umwelt, Univ. Frankfurt/M.
- CRU (Climatic Research Unit, Univ. Norwich, UK), 2008: Temperature. Internet <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>.
- DOTZEK, N., 2005: Tornado- und Downburstklimatologie. Deut. Wetterdienst, Klimastatusbericht 2004, 171-180.
- HUPFER, P., M. BÖRNGEN, 2004: Gibt es „Klimakatastrophen“? *Naturwiss. Rdsch.* **57**, 233-240.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, 996 S.
- JONAS, M., T. STAEGER, C.-D. SCHÖNWIESE, 2005: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland. *Bericht Nr. 1*, Inst. Atmosph. Umwelt, Univ. Frankfurt/M., 250 S.
- SCHÄR, C., et al., 2003: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, 332-336.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 2006: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. *Borntraeger*, Stuttgart (4. Aufl.), 302 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D., T. STAEGER, H. STEINER, S. BRINCKMANN, 2006: Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901 bis 2003. *Bericht Nr. 3*, Inst. Atmosph. Umwelt, Univ. Frankfurt/M., 74 S.
- SCHÖNWIESE, C.-D., T. STAEGER, S. TRÖMEL, 2004: The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. *Met. Z. (N.F.)* **13** (No.4), 323-327.
- SCHÖNWIESE, C.-D., S. TRÖMEL, 2006: Mehr extreme Niederschläge in Deutschland? *Naturwiss. Rdsch.* **59**, 194-199.
- STAEGER, T., M. JONAS, C.-D. SCHÖNWIESE, 2006: Auftreten und Dauer extremer Witterungsereignisse in Hessen (1951-2000). *Bericht Nr. 5*, Inst. Atmosph. Umwelt, Univ. Frankfurt, 41 S.
- TRÖMEL, S., 2005: Modellierung von Klimazeitreihen. *Bericht Nr. 1*, Inst. Atmosph. Umwelt, Univ. Frankfurt/M., 238 S.
- WEBSTER, P.J., et al., 2005: Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warmer environment. *Science* **309**, 1844-1846.