

Bundesgesundheitsbl 2019 · 62:571–579
<https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y>
 Online publiziert: 28. März 2019
 © Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil
 von Springer Nature 2019



Matthias an der Heiden¹ · Stefan Muthers² · Hildegard Niemann³ · Udo Buchholz¹ ·
 Linus Grabenhenrich^{1,4} · Andreas Matzarakis²

¹ Abteilung für Infektionsepidemiologie, Robert Koch-Institut, Berlin, Deutschland

² Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, Deutscher Wetterdienst, Freiburg, Deutschland

³ Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring, Robert Koch-Institut, Berlin, Deutschland

⁴ Klinik für Dermatologie, Venerologie und Allergologie, Charité Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Deutschland

Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015

Einleitung

Sechs der elf extremsten Hitzewellen im Zeitraum zwischen 1950 bis 2015 traten nach dem Jahr 2000 auf [1]. Der menschliche Einfluss auf das Klimasystem hat die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von extremen Temperaturen, wie etwa im Jahr 2003, in Europa deutlich vergrößert [2]. Mit einem anhaltenden anthropogen verursachten Klimawandel ist ein weiterer Anstieg der Anzahl von Hitzewellen in den kommenden Jahrzehnten zu erwarten [3], und das wirft die Frage nach den Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit auf.

In den Hitzesommern der Jahre 2003 und 2015 gab es in Deutschland eine erhebliche Anzahl von Todesfällen, bei denen Hitze als Todesursache belegbar war [3–5]. Europaweit führten im Jahr 2003 die hohen Temperaturen zusammen mit einer mangelnden Vorbereitung der Gesundheits- und Versorgungssysteme zu insgesamt mehr als 70.000 Todesfällen in 16 europäischen Ländern [6]. In Deutschland verstarben nach überschlägigen Schätzungen ca. 7000 Menschen an Herzinfarkt, anderen Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Nierenversagen, Atemwegserkrankungen und Stoffwechselstörung als Folgen der hitzebedingten Gesundheitsbelastungen [5, 7]. Hitzewellen wurden weltweit als bedeutendes Gesundheitsrisiko identifiziert [8, 9].

Die physiologischen Mechanismen der gesundheitsschädlichen Wirkungen

von Hitzebelastung sind gut bekannt und dokumentiert. Dehydrierung und reduzierte Blutviskosität aufgrund des höheren Flüssigkeitsverlusts erhöhen das Risiko für Thrombosen und andere Herz-Kreislauf-Erkrankungen [10]. Auch generell belastet die Hitze das Herz-Kreislauf-System und der Körper ist einem höheren Stress ausgesetzt, um die Körperkerntemperatur konstant zu halten. Dieser zusätzliche Stress kann zahlreiche bestehende Beschwerden verstärken [11], weswegen auch für andere Erkrankungen, wie etwa Erkrankungen der Atemwege, ein deutlicher Einfluss der Hitze nachgewiesen ist [12–14]. Ist die Thermoregulation eingeschränkt, können Entgleisungen des Wasser- und Elektrolythaushalts auftreten, die zu lebensbedrohlichen Beeinträchtigungen des Herz-Kreislauf-Systems führen können [4]. Insbesondere ältere, gebrechliche Menschen sind stark gefährdet durch Hitzestress [15], ebenso Patienten mit chronischen Erkrankungen, beispielsweise Herz-Kreislauf- oder Atemwegserkrankungen [16]. Darüber hinaus gibt es sozioökonomische Faktoren, wie das Leben in dicht bebauten Stadtgebieten [17], oder ökologische Faktoren, wie zum Beispiel erhöhte Ozon- und Feinstaubwerte [18], die das Risiko erhöhen, während einer Hitzewelle zu sterben.

Eine einheitliche Definition von Hitzewellen existiert nicht, je nach Anwendungsbereich und Untersuchungsregion findet sich eine Vielzahl möglicher Va-

riationen. Bei der Wahl einer Definition wird häufig ein Schwellenwert für die Temperatur und für die minimale Dauer festgelegt. Bei der Temperatur können absolute oder relative Schwellenwerte verwendet werden, Letztere z. B. über Perzentile, bei denen Schwellenwerte relativ zum typischen Klima einer Region oder der Jahreszeit definiert werden. Im Vergleich zu absoluten Schwellenwerten eignen sich diese besser für Vergleiche zwischen verschiedenen Ländern, da die Bevölkerung zu einem gewissen Maß an das lokale Klima angepasst ist. Ein Beispiel für einen absoluten Schwellenwert ist die Definition eines „heißen Tages“ als Tag mit Maximaltemperatur über 30 °C. Hinsichtlich der minimalen Dauer, ab der von einer Hitzewelle gesprochen werden kann, gibt es unterschiedliche Definitionen [19–21]. In Dänemark beispielsweise werden Hitzewarnungen herausgegeben, wenn der Durchschnitt der Tagesmaximaltemperaturen an 3 aufeinanderfolgenden Tagen über 28 °C liegt. In der Schweiz, wo eine kombinierte Größe aus Lufttemperatur und -feuchte verwendet wird, müssen die Schwellenwerte an mindestens 3 Tagen in Folge überschritten werden.

Für die Beurteilung der Schwere einer Hitzewelle wird als eine wichtige Größe die Zahl der hitzebedingten Todesfälle verwendet. Hitzebedingte Todesfälle werden meist nicht als solche in der Todesursachenstatistik codiert, sondern aufgrund der Tatsache, dass die Hitze

meist nur bereits bestehende Symptome verstärkt, anderen Todesursachen zugeschrieben, beispielsweise Krankheiten des Herz-Kreislauf-Systems. Daher ist es üblich, die bei einer Hitzeperiode zusätzlich auftretenden Todesfälle als sogenannte Exzessmortalität (Übersterblichkeit) mittels statistischer Verfahren zu schätzen. Die Exzessmortalität wird als Differenz des Verlaufs der beobachteten Mortalität und eines geschätzten Verlaufs der Mortalität ohne Hitzeperioden berechnet. Um dieses Verfahren anzuwenden, wird eine Zeitreihe über mindestens fünf Jahre benötigt.

Einige Studien konnten nach Hitzeperioden eine Periode von wenigen Tagen identifizieren, in der die Mortalität unter die erwartete Mortalität fällt. Diese Untersterblichkeit, die bis zu 30 Tage nach einem Hitzeereignis auftritt, kann aufgrund einer Vorverlegung des Todeszeitpunktes um wenige Tage („short-term mortality displacement“) bei Personen vorkommen, die bereits schwer erkrankt oder gebrechlich sind [18]. Sie tritt jedoch nur in rund 20–30% der Fälle auf [13]; Armstrong et al. [22] belegen, dass die Todesfälle, die mit extremem Hitzeinfluss verbunden sind, in den meisten Fällen das Leben um mindestens 1 Jahr verkürzt haben. Gesundheitsschädliche Auswirkungen von hohen Temperaturen werden somit als signifikant für die öffentliche Gesundheit bestätigt und nicht nur als eine kurzfristige Verschiebung von Todeszeiten. Daher wird im Folgenden weiterhin der Begriff „hitzebedingte Todesfälle“ verwendet, auch wenn Hitze, wie erläutert, in vielen Fällen nicht die alleinige Todesursache ist.

Mit dem Ziel, die Mortalität innerhalb der Mitgliedstaaten der EU fortlaufend und zeitnah in gleicher Weise zu erheben und die auftretende Exzessmortalität zu berechnen, wurde das Projekt EuroMOMO (European Monitoring of Excess Mortality for Public Health Action; [23]) im Jahr 2008 von der Generaldirektion Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (GD Sanco) der Europäischen Kommission ins Leben gerufen. Die teilnehmenden Länder haben jeweils eine Mortalitäts-Surveillance etabliert und werten aktuelle Daten zur Gesamtsterblichkeit aus

(siehe dazu auch <http://www.euromomo.eu>).

Ziele der Analyse in diesem Beitrag sind die Schätzung der hitzebedingten Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015 und die Beschreibung des dazu entwickelten statistischen Modells.

Methoden

Datengrundlage

Epidemiologische Daten

Es wurden aggregierte Mortalitätsdaten des statistischen Bundesamtes (Destatis) verwendet, die die wöchentliche Gesamtsterblichkeit nach Bundesländern und Altersjahrgängen in den Jahren 2001 bis 2015 beschreiben. Für die weitere Analyse wurden die Altersgruppen 0–64, 65–74, 75–84, 85+ Jahre betrachtet.

Deutschland wurde in die drei Regionen „Nord“ (bestehend aus den Bundesländern Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein), „Mitte“ (Berlin, Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Hessen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) und „Süd“ (Baden-Württemberg, Bayern) eingeteilt.

Wetterdaten

Die verwendeten Wetterdaten stammen aus dem Bodenmessnetz des Deutschen Wetterdienstes. Für jedes Bundesland wurden 2 bis 6 repräsentative Stationen verwendet, auf deren Grundlage die Mittelwerte für das Bundesland berechnet wurden (bei Stadtstaaten teilweise nur eine Messstation). Die Stationen wurden auf Basis der folgenden Kriterien ausgewählt:

- der Zeitraum 2001 bis 2015 wurde ohne größere Stationsverlegungen oder Geräteausfälle abgedeckt,
- alle notwendigen Parameter wurden gemessen: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windstärke und Sonnenscheindauer,
- bei größeren Bundesländern wurden Siedlungsschwerpunkte gleichmäßig über die Fläche berücksichtigt,

- besonders hoch gelegene Stationen (Bergstationen) wurden ausgeschlossen.

In dieser Analyse werden als mögliche Hitzeindikatoren die Lufttemperatur, der Humidex und die Gefühlte Temperatur verglichen: Der Humidex (H) berechnet sich aus der Lufttemperatur (T) und dem Wasserdampfgehalt der Luft (e; [24]) wie folgt:

$$H = T + \frac{5}{9}(e - 10).$$

Die Gefühlte Temperatur bezieht neben Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit auch die Windstärke und die Einwirkung von direkter Sonnenstrahlung ein und verbindet diese mit einem Energiebilanzmodell des Menschen (Klima-Michel-Modell; [25]). Basierend auf den stündlichen Messwerten von 0–24 Uhr wurden für jeden der drei Indikatoren die Tagesdurchschnitts-/Maximal- und Minimalwerte betrachtet. Diese Tageswerte wurden über die ausgewählten Wetterstationen des jeweiligen Bundeslandes gemittelt und danach über die Wochentage der Kalenderwochen aggregiert. Konkret betrachtet wurden der Wochenmittelwert, der Wochenmaximalwert und der Wochenminimalwert der drei Hitzeindikatoren sowie das wöchentliche Mittel des Tagesmaximalwertes und des Tagesminimalwertes, sodass insgesamt 15 Einzelmodelle verglichen wurden.

Generalisiertes additives Modell zur Schätzung der hitzebedingten Todesfälle

Zur Schätzung der hitzebedingten Mortalität wurde der statistische Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Mortalität und den einzelnen Hitzeindikatoren untersucht. Es wurden die Wochen zwischen der 15. und der 40. Kalenderwoche in den Jahren 2001 bis 2015 analysiert. Da zwischen den Hitzeindikatoren und der Mortalität ein nichtlinearer Zusammenhang vorliegt, wurde ein generalisiertes additives Modell (GAM) mit logarithmischer Linkfunktion und negativ-binomialer Verteilung verwendet [26]. Dieses Modell berücksichtigt auch den

Bundesgesundheitsbl 2019 · 62:571–579 <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y>
 © Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

M. an der Heiden · S. Muthers · H. Niemann · U. Buchholz · L. Grabenhenrich · A. Matzarakis

Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015

Zusammenfassung

Hintergrund. In den Hitzesommern der Jahre 2003 und 2015 gab es in Deutschland eine erhebliche Anzahl von Todesfällen, bei denen Hitze als Todesursache belegbar war. Bisher liegen zur Schätzung der Gesamtzahl hitzebedingter Todesfälle in Deutschland aber nur regionale Analysen vor, die dann beispielsweise für den Sommer 2003 auf Deutschland hochgerechnet wurden.

Ziel der Arbeit. Die vorliegende Analyse versucht einen systematischen Zusammenhang zwischen Wärmebelastung und einer erhöhten Mortalität in Deutschland statistisch zu belegen und die Zahl der hitzebedingten Todesfälle im Zeitraum 2001 bis 2015 zu quantifizieren.

Material und Methoden. Durch die Anpassung eines nichtlinearen statistischen Modells wurden Expositions-Wirkungs-Kurven geschätzt, die den Einfluss von Hitzewellen auf die Mortalitätsrate in Deutschland beschreiben. Die Performance verschiedener Hitzeindikatoren innerhalb dieses Modells wurde verglichen.

Ergebnisse und Diskussion. Der Modellvergleich ergab, dass mit der Wochenmitteltemperatur der Verlauf der Mortalität am besten erklärt werden konnte. Der Zusammenhang zwischen Mortalitätsrate und Wochenmitteltemperatur war unterschiedlich für verschiedene Altersgruppen und Regionen in Deutschland (Norden, Mitte, Süden). Die größten Auswirkungen der Hitze zeigten sich

in den Altersgruppen 75–84 und 85+. Die höchste Anzahl hitzebedingter Todesfälle in Deutschland lag im Sommer 2003 mit 7600 (95 %-KI 5500–9900), gefolgt von den Sommern im Jahr 2006 mit 6200 (95 %-KI 4000 – 8000) und im Jahr 2015 mit 6100 (95 %-KI 4000 – 8300) Todesfällen.

Fazit. Mit dieser Arbeit wurde gezeigt, dass auch in wöchentlichen Mortalitätsdaten ein klarer Einfluss der Wärmebelastung identifiziert werden kann. Wünschenswert wäre eine bundesweite Mortalitäts-Surveillance, die ein zeitnahes Monitoring ermöglicht.

Schlüsselwörter

Hitzestress · Hitzewelle · Exzessmortalität · Medizinmeteorologie · Klimawandel

Estimation of heat-related deaths in Germany between 2001 and 2015

Abstract

Background. During the summers of 2003 and 2015, heat was found to be the cause of a substantial number of deaths in Germany. Until now, estimates for the total number of heat-related deaths were only available regionally in Germany. For the summer of 2003, an analysis for Baden-Württemberg was extrapolated to the whole of Germany.

Objectives. Our analysis tries to prove a stable statistical relationship between heat and mortality and to use this to quantify the number of heat-related deaths in Germany between the years 2001 and 2015.

Materials and methods. By fitting a nonlinear statistical model, we estimated exposure-

response curves that describe the influence of heat on the mortality rate. The performance of different indicators for heat stress was compared.

Results. The comparison of the different indicators for heat showed that the weekly mean temperature was most useful to explain the course of the weekly mortality during the summer. The relation between mortality rate and weekly mean temperature varied between age groups and regions in Germany (north, middle, south). The age groups (75–84) and (85+) were most affected by heat. The highest number of heat-related deaths was 7600 (95% CI 5500–9900), found for the

summer 2003, followed by 6200 (4000; 8000) in the summer 2006 and 6100 (4000; 8300) in the summer 2015.

Conclusions. We could show that even in weekly data on mortality, a clear influence of heat could be identified. A national surveillance of mortality that allows real-time monitoring would be desirable.

Keywords

Heat stress · Heatwave · Excess mortality · Human biometeorology · Climate change

Zählcharakter der Sterbedaten und die sich ändernde Bevölkerung in den Altersgruppen.

Neben dem Effekt des jeweiligen Hitzeindikators enthält das Modell eine periodische Funktion zur Beschreibung der jährlichen Periodizität (Saisonalität) und einen nichtlinearen zeitlichen Trend, um langfristige Änderungen der Mortalität, etwa aufgrund der steigenden Lebenserwartung, abzubilden.

Für jede Region ergibt sich insgesamt folgende Modellgleichung für die beobachtete Anzahl von Todesfällen ($s_{t,a}$) und ihren modellierten Erwartungswert

($E(s_{t,a})$) für Altersgruppe (a) und laufende Woche (t) in Abhängigkeit von dem Hitzeindikator (h_t), der Bevölkerungsgröße ($b_{t,a}$) sowie der Kalenderwoche (w_t):

$$s_{t,a} \sim \text{NegBin}(E(s_{t,a}), \vartheta)$$

$$E(s_{t,a}) = b_{t,a} \exp\left(\beta_a + f_a^{\text{Saison}}(w_t) + f_a^{\text{Trend}}(t) + f_a^{\text{Hitze}}(h_t)\right).$$

Die Funktionen f_a^{Saison} , f_a^{Trend} und f_a^{Hitze} modellieren dabei den jeweiligen

nichtlinearen Einfluss auf die altersspezifische Mortalität. Der Parameter ϑ modelliert die Überdispersion, also inwiefern die Varianz größer als der Erwartungswert der negativ-binomialen Verteilung geschätzt wurde. Die Freiheitsgrade der Trendkomponente und der Hitzeabhängigkeit wurden auf 8 beschränkt, um insbesondere an den Rändern des Zeitraums 2001 bis 2015 und den Rändern des Temperaturbereichs einen stabilen Zusammenhang zu gewährleisten. Die Freiheitsgrade der saisonalen Komponente wurden nicht beschränkt. Ein ähnliches Modell wurde

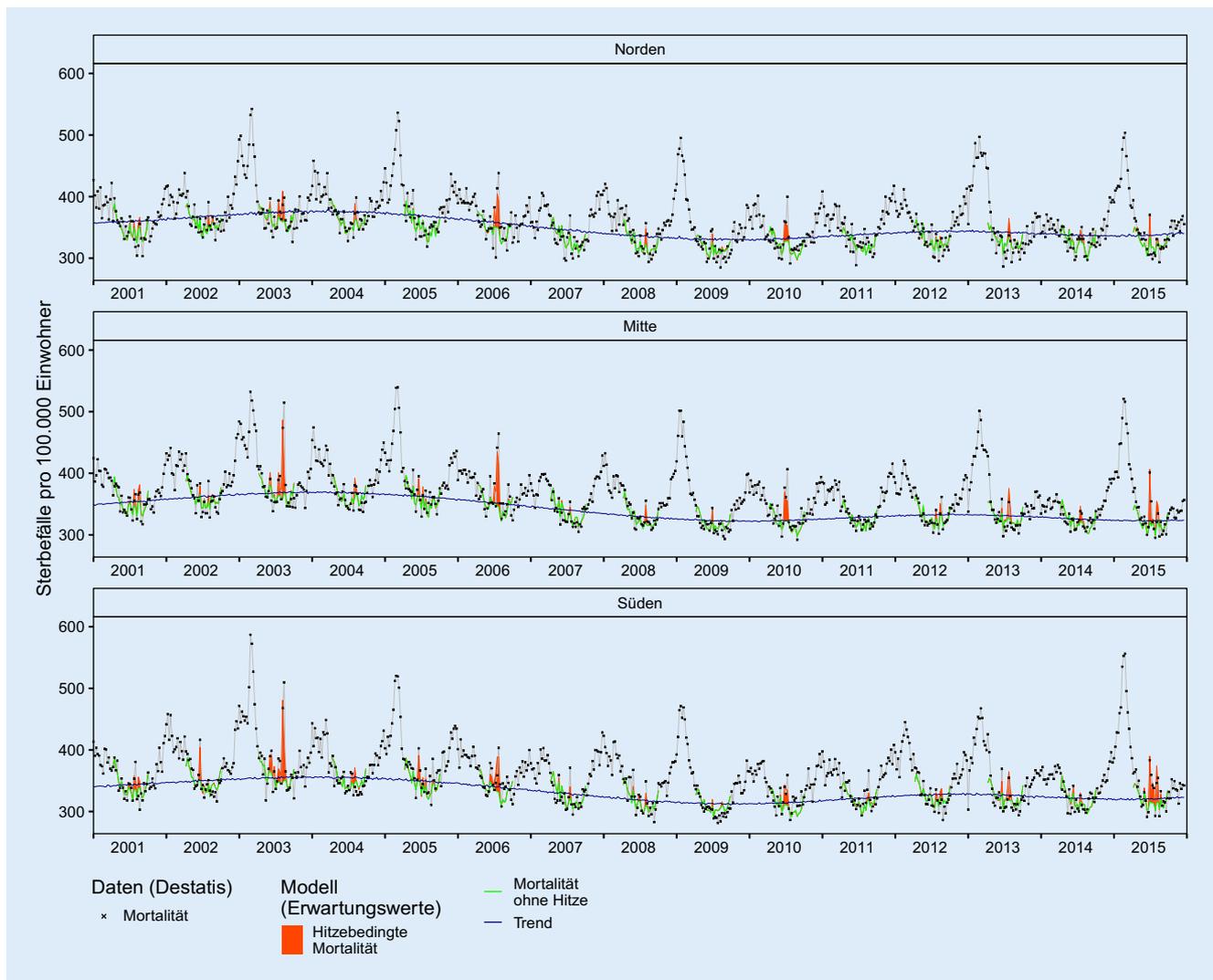


Abb. 1 ▲ Verlauf der wöchentlichen Mortalität in Deutschland für die Altersgruppe 85+ nach Region in den Jahren 2001–2015 (Destatis-Daten, mit grauer Linie verbunden). Modellierung der Sommerwochen (15. bis 40. Kalenderwoche) mit dem generalisierten additiven Modell unter Einbeziehung der Wochenmitteltemperatur. Die Mortalität im Winter wird zum Vergleich mit dargestellt, sie liegt typischerweise über der Mortalität im Sommer

beispielsweise schon zur Berechnung zusätzlicher Arztbesuche durch Influenza verwendet [27].

Das Modell wurde für jeden der 15 verschiedenen Hitzeindikatoren an die Mortalitätsdaten angepasst und mithilfe des Akaike-Informationskriteriums (AIC) verglichen. Anhand der Expositions-Wirkungs-Funktion (f_{Hitze}) wurde anschließend ein Schwellenwert zur Definition der hitzebedingten Sterblichkeit festgelegt. Dieser Schwellenwert wurde dann auch zur Definition einer Hitzewoche verwendet.

Um die Zahl der hitzebedingten Todesfälle zu quantifizieren, wurde die erwartete Mortalität ohne Hitze auf fol-

gende Weise bestimmt: Zunächst wurde ein modifizierter Verlauf des Hitzeindikators h_t^* konstruiert, der bei dem vorher bestimmten Schwellenwert h^* gedeckelt wurde, also $h_t^* = \min(h_t, h^*)$. Dann wurde aus dem Modell der Verlauf der Mortalität gesampelt, der für den gedeckelten Hitzeindikator erwartet werden würde. Die wöchentliche Anzahl hitzebedingter Todesfälle ergab sich dann als Differenz zwischen der modellierten Mortalität für den realen Verlauf und dem gedeckelten Verlauf des Hitzeindikators.

Das GAM wurden mithilfe der Statistiksoftware R (Version 3.5.1, Package „mgcv“; [28]) gefittet.

Um die langfristige Entwicklung der Häufigkeit von Hitzezeiten nach der hier verwendeten Definition darzustellen, wurden Daten von 6 Wetterstationen aus dem Bodenmessnetz des Deutschen Wetterdienstes untersucht, die die Temperatur und weitere Klimavariablen besonders lange, in gleicher Weise und am gleichen Ort gemessen haben. Ein langfristiger Trend wurde mithilfe eines negativ-binomialen Regressionsmodells ermittelt.

Ergebnisse

Ein Vergleich der 15 Einzelmodelle für die verschiedenen Hitzeindikatoren mit-

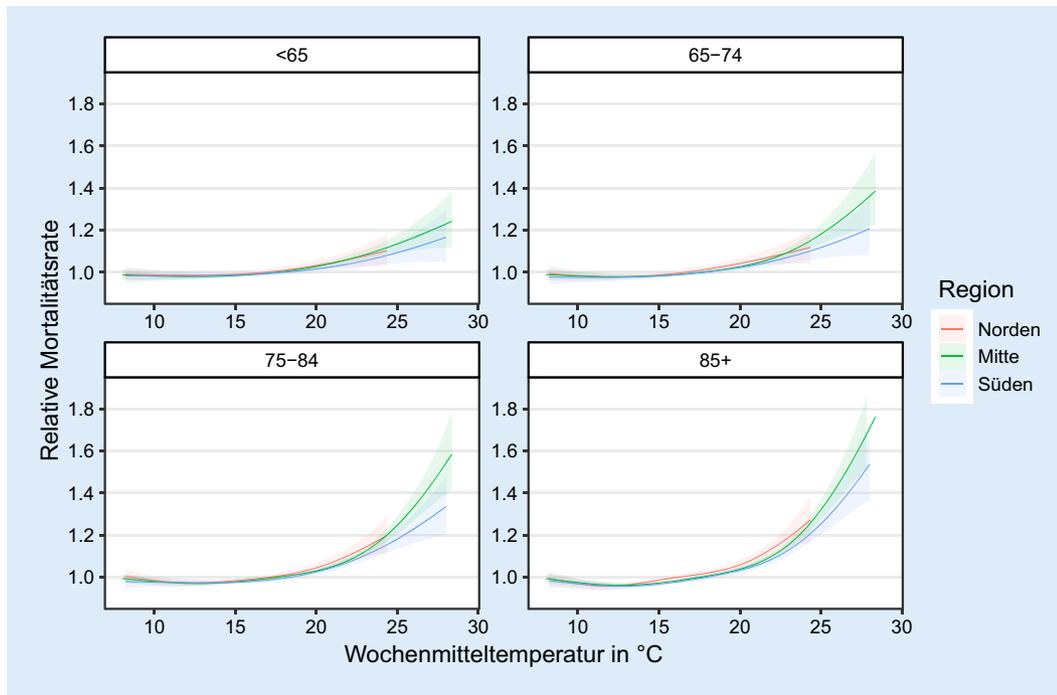


Abb. 2 ◀ Verlauf der relativen Mortalitätsrate in Deutschland in Abhängigkeit von der Wochenmitteltemperatur nach Region und Altersgruppe (Expositions-Wirkungs-Kurven), Datenbasis: Mortalität zwischen der 15. und 40. Kalenderwoche der Jahre 2001 bis 2015

tels des Akaike-Informationskriteriums (AIC) ergab, dass der Wochenmittelwert der Lufttemperatur (Wochenmitteltemperatur) in allen Regionen die beste Erklärung der wöchentlichen Mortalität ermöglicht. Der AIC-Wert des Einzelmodells mit der Wochenmitteltemperatur war in allen drei Regionen um mindestens 32 Punkte besser als die übrigen AIC-Werte, was auf eine stabile Überlegenheit der Wochenmitteltemperatur zur Erklärung der wöchentlichen Mortalität hindeutet, im Vergleich zu der Wochenmaximaltemperatur, dem Wochenmittel der Tagesmaximaltemperatur und Tagesminimaltemperatur und den entsprechenden Größen für Humidex und Gefühlte Temperatur.

In **Abb. 1** sind exemplarisch die Ergebnisse für die Altersgruppe 85+ getrennt nach Region dargestellt. Es wird deutlich, dass eine erhöhte Mortalität im Sommer im Wesentlichen durch erhöhte Wochenmitteltemperaturen erklärt werden kann, auch wenn die Peaks nicht immer ganz vollständig nachgebildet werden konnten. Letzteres galt insbesondere für die Peaks in den Jahren 2006 und 2010 und etwas weniger im Jahr 2003.

Die Expositions-Wirkungs-Kurven für die Regionen verlaufen leicht unterschiedlich (**Abb. 2**). Die Minima der

Wochenmitteltemperatur zwischen der 15. und 40. Kalenderwoche der Jahre 2001 bis 2015 lagen in allen Regionen und Altersgruppen in einem sehr ähnlichen Bereich bei etwa 10–15°C. Im Norden traten Wochenmitteltemperaturen von über 25°C im Untersuchungszeitraum gar nicht auf. Besonders in den Altersgruppen 75–84 und 85+ zeigte sich eine deutlich steigende Mortalitätsrate bei Temperaturen über 20°C. Diese Erhöhung fällt im Norden etwas höher und im Süden niedriger als in der Region Mitte aus.

Ab einer Wochenmitteltemperatur über 20°C lag in den Sommerwochen der Jahre 2001 bis 2015 in mehr als der Hälfte der Wochen die Wochenmaximaltemperatur bei über 30°C (**Abb. 3**). Im Bereich von Wochenmitteltemperaturen zwischen 15°C und 19°C gab es nur einzelne Wochen mit Wochenmaximaltemperatur über 30°C, von denen die meisten nur an einem Tag Temperaturen über 30°C erreichten. Im Vergleich der Regionen lagen die Temperaturen in allen Regionen durchschnittlich etwa für 11 Tage zwischen 15°C und 19°C. Im Norden gab es an durchschnittlich 2,2 Tagen eine Wochenmitteltemperatur über 20°C, in der Mitte waren es 3,5 Tage und im Süden sogar 4,7 Tage.

Die Mortalitätsrate lag im Norden nie über 130 pro 100.000 Einwohner (**Abb. 4**); der stärkste Hitzeeinfluss zeigte sich in den Jahren 2003 und 2006, wo in der Altersgruppe 85+ etwa 113 und 123 hitzebedingte Todesfälle pro 100.000 Einwohner auftraten. Diese Raten waren allerdings nur grenzsignifikant mit einem 95%-Konfidenzintervall von etwa –60 bis 330 pro 100.000 Einwohner. In den Regionen Mitte und Süden zeigten sich besonders hohe hitzebedingte Mortalitätsraten in den Jahren 2003, 2006 und 2015 und obwohl die Expositions-Wirkungs-Kurve im Süden etwas niedrigere relative Mortalitätsraten ergab, war doch aufgrund der höchsten Exposition dort die hitzebedingte Mortalität am höchsten. Das Jahr 2003 zeigte mit 350/100.000 in der Region Süden die höchste Rate. Die höchste Gesamtzahl hitzebedingter Todesfälle in Deutschland lag demnach im Sommer 2003 mit 7600 (95%-KI 5500–9900), gefolgt von den Sommern im Jahr 2006 mit 6200 (95%-KI 4000; 8000) Todesfällen und im Jahr 2015 mit 6100 (95%-KI 4000; 8300; **Tab. 1**).

Bei den betrachteten sechs Wetterstationen mit lange zurückreichenden Messreihen zeigt sich durchgängig ein zunehmend häufiges Auftreten von Hitzewo-

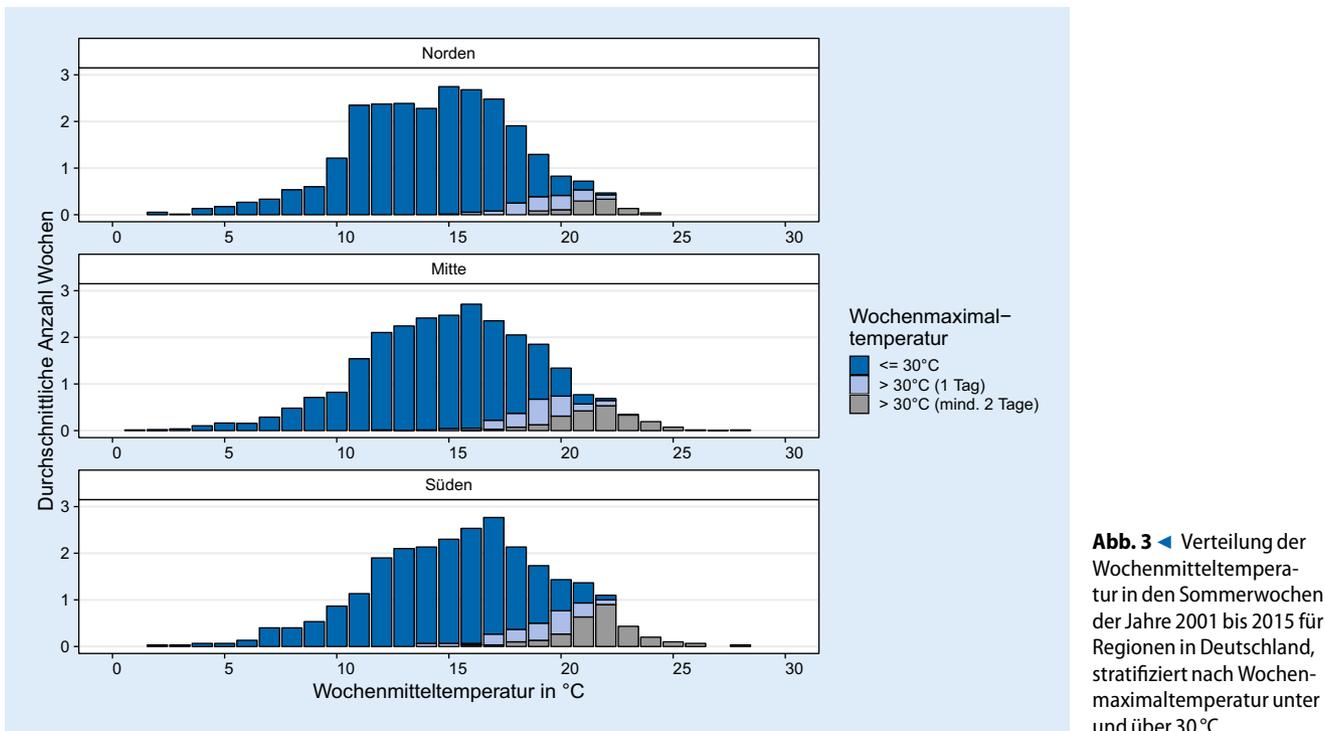


Abb. 3 ◀ Verteilung der Wochenmitteltemperatur in den Sommerwochen der Jahre 2001 bis 2015 für Regionen in Deutschland, stratifiziert nach Wochenmaximaltemperatur unter und über 30 °C

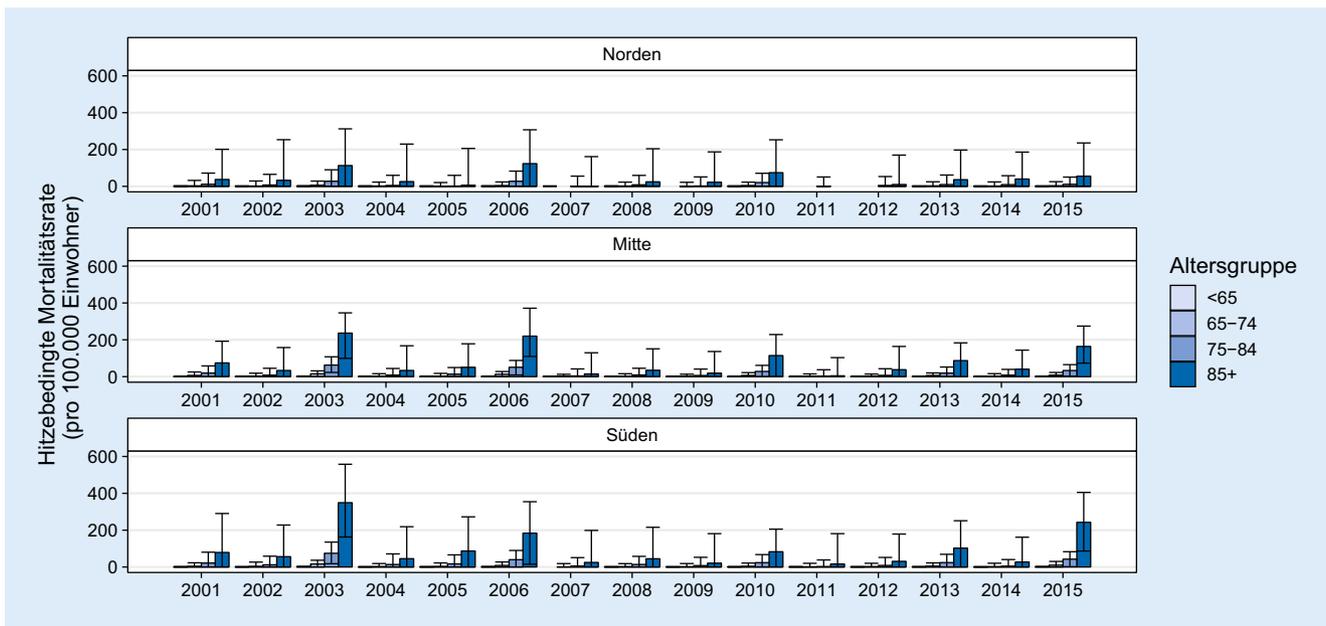


Abb. 4 ▲ Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region zwischen 2001 und 2015

chen über die Zeit (▣ **Abb. 5**). Durchschnittlich stieg die Anzahl von Wochen mit Wochenmitteltemperatur über 20 °C im Zeitraum zwischen den Jahren 1875 und 2017 alle 10 Jahre um etwa 8,1% (95%-KI 6,5–9,9%) und damit im Mittel von 1,05 im Jahr 1875 auf 3,9 im Jahr 2017.

Diskussion

Zur Schätzung der Anzahl hitzebedingter Todesfälle in Deutschland wurde ein statistisches Modell entwickelt, das über die Schätzung einer Expositions-Wirkungs-Funktion eine hohe Evidenz für einen systematischen Zusammenhang zwischen hohen Wochenmitteltempera-

turen und einer erhöhten Mortalität in den betrachteten Regionen und Altersgruppen erbrachte.

Die geschätzte Zahl von 7600 (95%-KI 5500; 9900) hitzebedingten Todesfällen im Sommer 2003 in Deutschland entspricht der in einer früheren Schätzung ermittelten Zahl von etwa 7000 [5, 7]. Neben dem Sommer 2003 wurde auch

Tab. 1 Geschätzte Gesamtzahl hitzebedingter Todesfälle in Deutschland mit 95 %-Konfidenzintervall, 2001 bis 2015

Jahr	Geschätzte Anzahl Todesfälle (95 %-Konfidenzintervall)
2001	2300 (-100; 4100)
2002	1300 (-700; 3300)
2003	7600 (5500; 9900)
2004	1100 (-1000; 3400)
2005	1600 (-400; 3600)
2006	6200 (4000; 8000)
2007	400 (-1300; 2400)
2008	1300 (-800; 3600)
2009	800 (-1200; 2700)
2010	3700 (1700; 5900)
2011	300 (-2100; 2500)
2012	1200 (-900; 3500)
2013	3300 (800; 5200)
2014	1400 (-800; 3600)
2015	6100 (4000; 8300)

Signifikant erhöhte Anzahlen nur in den Jahren 2003, 2006, 2010, 2013 und 2015 (Hervorhebung durch Fettdruck)

für die Sommer der Jahre 2006, 2010, 2013 und 2015 eine signifikante Anzahl hitzebedingter Todesfälle ermittelt, was mit regionalen Auswertungen für diesen Zeitraum übereinstimmt [3, 29].

Die geschätzte Anzahl hitzebedingter Todesfälle basiert wesentlich auf dem verwendeten Schwellenwert von 20 °C für die Wochenmitteltemperatur. Ab einer Wochenmitteltemperatur von etwa 20 °C zeigte die Expositions-Wirkungskurve in allen vier Altersgruppen einen steileren Anstieg (Abb. 2). Der Schwellenwert von 20 °C passt auch zum subjektiven Hitzeempfinden des Menschen, da in der Mehrzahl dieser Wochen die Wochenmaximaltemperatur über 30 °C lag (Abb. 3). Das thermische Optimum lag bei einer Wochenmitteltemperatur zwischen 10 °C und 15 °C (Abb. 2), daher würde die Festlegung eines niedrigeren Schwellenwertes von beispielsweise 15 °C zu höheren Schätzwerten von wärmeassoziierten Todesfällen führen. Insbesondere würde dadurch für alle Jahre des Untersuchungszeitraums außer für 2011 eine signifikant erhöhte Sterblichkeit berechnet werden. Besonders stark würde die geschätzte Anzahl von Todesfällen in den Hitzesommern

2003, 2006, 2013 und 2015 ansteigen, sodass diese Sommer noch stärker mit ungewöhnlich hoher wärmeassoziiert Mortalität auffielen. Daher ist die Schätzung der hitzebedingten Todesfälle in der vorliegenden Arbeit mit einem Schwellenwert von 20 °C Wochenmitteltemperatur eher konservativ.

Die regionale Differenzierung zeigt, dass die hitzebedingte Mortalität wahrscheinlich auch im Norden von Deutschland von Bedeutung ist. Zwar sind Wochenmittel über 20 °C im Norden seltener und überschreiten kaum den Wert von 24 °C, trotzdem sind in einzelnen Jahren (2003, 2006) die zusätzlichen Todesfälle auch im Norden nicht unerheblich. Durch ein Absenken des Schwellenwertes für die Wochenmitteltemperatur auf 15 °C würde auch im Norden für die Jahre 2003, 2006, 2010, 2013 und 2015 eine signifikante Anzahl von hitzebedingten Todesfällen geschätzt.

Eine Limitation dieser Analyse ist es, dass nur die Jahre 2001 bis 2015 untersucht werden konnten, da vom Statistischen Bundesamt Todesfalldaten nur bis zum Jahr 2015 zur Verfügung gestellt wurden. Eine bundesweite zeitnahe Mortalitäts-Surveillance würde das Monitoring des gesundheitlichen Impacts von Hitzewellen ermöglichen. Hierfür wäre eine zeitnahe Überwachung der Zahl der Todesfälle – unabhängig von der Todesursache – völlig ausreichend. Benötigt würden ausschließlich Angaben zu dem Sterbedatum, dem Alter (in Jahren), dem Geschlecht, dem Landkreis des Wohnortes und der meldenden Stelle sowie dem Bearbeitungsdatum der Todesfälle. Dies würde die betreffenden Institutionen und Ämter zeitnah in die Lage versetzen, den Verlauf der Mortalität während einer Hitzewelle zu bewerten und gegebenenfalls zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen [30].

Die Mortalitäts-Surveillance lässt sich sinnvoll ergänzen durch die Schätzung der hitzebedingten Morbidität. Aktuell entwickelt z. B. das Robert Koch-Institut gemeinsam mit einer Auswahl von Pilotkrankenhäusern und Akteuren des öffentlichen Gesundheitswesens eine IT-Infrastruktur zur zeitnahen Nutzung von Daten aus Notaufnahmen für die Public-Health-Surveillance (www.rki.de/eseg).

Dieses System wird es unter anderem ermöglichen, aktuelle Veränderungen von Krankheitshäufigkeiten (soweit im Kontext von Notaufnahmen erfasst) im Kontext von Wetterdaten zu analysieren.

Die Modellierung der Mortalität mit den betrachteten alternativen Hitzeindikatoren Humidex und Gefühlte Temperatur konnten den Verlauf der Mortalität im Vergleich weniger gut erklären. Beide Indikatoren wurden entwickelt, um die momentane Belastung eines Menschen zu beschreiben, zum Beispiel zum Zeitpunkt des Tagesmaximums. Bei größeren zeitlichen Mittelungen scheinen diese Parameter weniger gut geeignet zu sein. Ein weiterer Grund könnte darin liegen, dass die zusätzlich berücksichtigten Parameter Feuchtigkeit, Wind und Sonneneinstrahlung räumlich stärker variieren als die Temperatur. Das berechnete Gebietsmittel ist dann weniger repräsentativ für große Teile der Bevölkerung. Zudem könnten sich insbesondere Menschen, die empfindlich auf Hitze reagieren, im Fall einer Hitzewelle überwiegend in Gebäuden oder an anderen geschützten Orten aufhalten, an denen dann hauptsächlich die Temperatur einen Einfluss ausübt. Der gleiche Grund könnte dazu führen, dass die Wochenmitteltemperatur auch besser die Exzessmortalität erklärt als die Wochenmaximaltemperatur, weil dann nicht so sehr die wöchentlichen Spitzenwerte, sondern mehr die kontinuierliche Aufheizung über die Woche relevant wäre.

Inwiefern auch Tagesmitteltemperaturen besser als Tagesmaximal- oder Tagesminimaltemperaturen mit den Mortalitätsdaten korrelieren, könnte nur anhand tagesgenauer Daten zur Mortalität analysiert werden. Insgesamt liegt daher in der Verwendung wöchentlicher Daten eine Limitation der vorliegenden Analyse. Auch die Verzögerung zwischen dem Zeitpunkt der Hitze einwirkung und dem Tod lässt sich mit tagesgenauen Daten deutlich besser ermitteln. In dieser Analyse wird nur der Effekt von Hitze auf die Mortalität in der gleichen Kalenderwoche untersucht; basierend auf den wöchentlichen Daten könnte in einem ähnlichen Modell auch der Einfluss der Temperaturen einer oder mehrerer Vorwochen berücksichtigt werden.

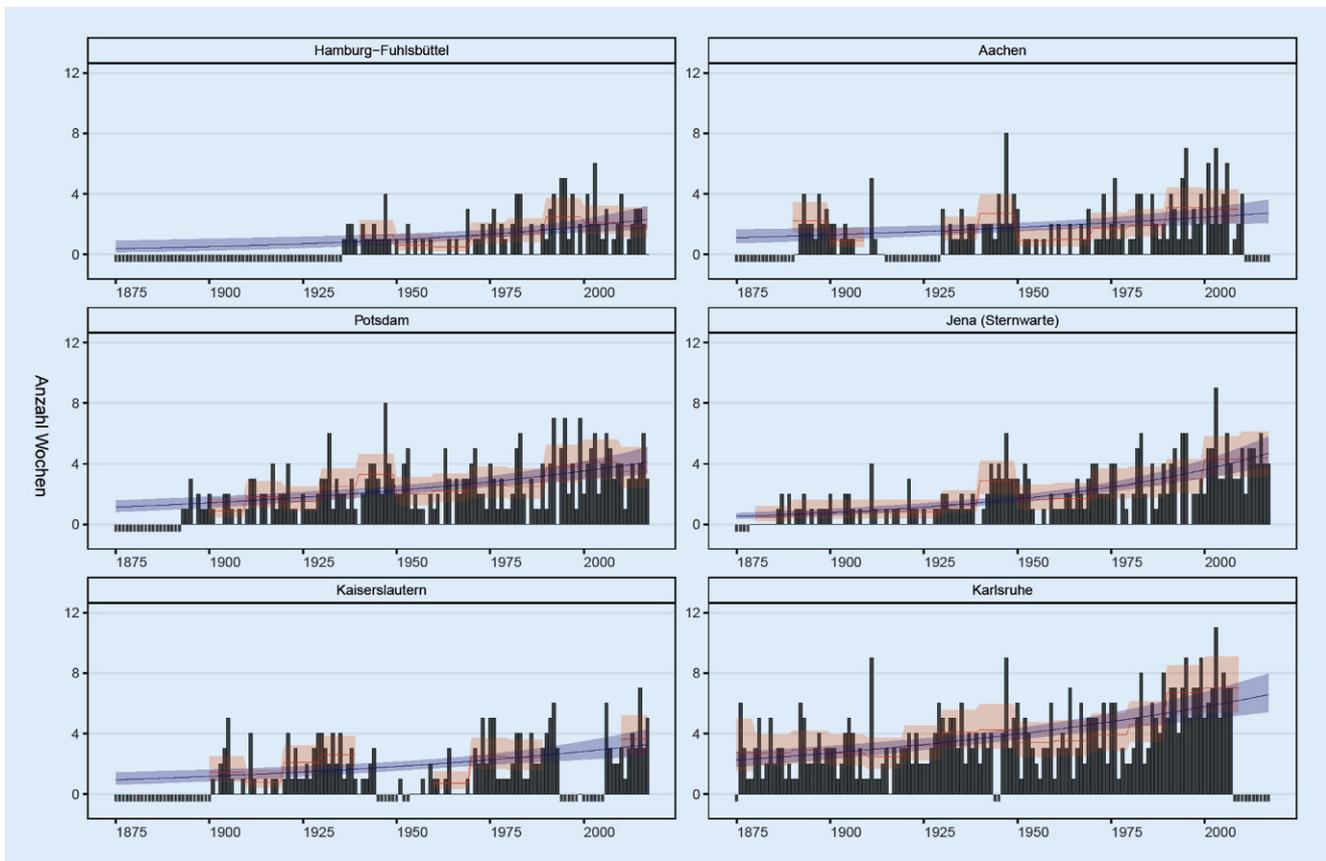


Abb. 5 ▲ Verlauf der jährlichen Anzahl von Wochen mit Wochenmitteltemperatur über 20 °C in sechs Wetterstationen zwischen 1875 und 2017. Jahre mit fehlenden Werten sind über eine Anzahl kleiner Null markiert. In orangerot ist die mittlere Anzahl pro Dekade und in blau der langfristige Trend angegeben. Mittelwert und Trend sind jeweils von einem 95 %-Konfidenzbereich umgeben

Fazit

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass auch in wöchentlichen Mortalitätsdaten ein klarer Einfluss der Belastung durch Hitze identifiziert werden kann. Dabei zeigte sich der Anstieg der Mortalität vor allem in den Regionen im Süden und in der Mitte Deutschlands, etwas schwächer auch im Norden. Für den hier verwendeten Parameter der Wochen mit einer Mitteltemperatur >20 °C ist bereits für die letzten Jahrzehnte eine klare Zunahme zu verzeichnen. Dieser Trend wird sich vermutlich im Zuge des anthropogenen Klimawandels weiter fortsetzen und eventuell noch verschärfen.

Wünschenswert wäre eine bundesweite Mortalitäts-Surveillance, die ein zeitnahes Monitoring ermöglicht. Damit könnten die betreffenden Institutionen und Ämter aktuell und schnell Hitzeperioden bewerten und gegebenenfalls

zusätzliche Interventionen einleiten. Notwendig wäre dazu das Bereitstellen von tagesgenauen anonymen Sterbedaten.

Korrespondenzadresse

Matthias an der Heiden
Abteilung für Infektionsepidemiologie, Robert Koch-Institut
Seestraße 10, 13353 Berlin, Deutschland
AnderHeidenM@rki.de

Danksagung. Wir danken dem Statistischen Bundesamt (Destatis) für die Bereitstellung der wöchentlichen Mortalitätsdaten.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. M. an der Heiden, S. Muthers, H. Niemann, U. Buchholz, L. Grabenhenrich und A. Matzarakis geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Literatur

1. Russo S, Sillmann J, Fischer EM (2015) Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ Res Lett* 10:124003
2. Stott PA, Stone DA, Allen MR (2004) Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432:610
3. Muthers S, Laschewski G, Matzarakis A (2017) The summers 2003 and 2015 in South-West Germany: heat waves and heat-related mortality in the context of climate change. *Atmosphere (Basel)* 8:224
4. Zacharias S, Koppe C (2015) Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. *Umwelt & Gesundheit* 6. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
5. Mücke H-G, Matzarakis A (2017) Klimawandel und Gesundheit. In: Wichmann HE, Fromme H (Hrsg) *Handbuch für Umweltmedizin*. Ecomed, Landsberg am Lech, S1–38

6. Robine J-M, Cheung SLK, Le Roy S et al (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *CR Biol* 331:171–178
7. Ingendahl B, Thieme I (2009) Health effects due to climate change—Information and awareness raising as an essential part of adaptation measures. *UMID Umwelt Mensch Informationsd* 3:5–7
8. Koppe C, Kovats SR, Menne B, Jendritzky G (2004) Heat-waves: risks and responses. In: *Health and global environmental change*. Series No. 2. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen
9. Mora C, Dousset B, Caldwell IR et al (2017) Global risk of deadly heat. *Nat Clim Chang* 7:501
10. Keatinge WR, Coleshaw SR, Easton JC, Cotter F, Mattock MB, Chelliah R (1986) Increased platelet and red cell counts, blood viscosity, and plasma cholesterol levels during heat stress, and mortality from coronary and cerebral thrombosis. *Am J Med* 81:795–800
11. Havenith G (2005) Temperature regulation, heat balance and climatic stress. In: *Extreme weather events and public health responses*. Springer, Berlin Heidelberg, S69–80
12. Michelozzi P, Accetta G, De Sario M et al (2009) High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities. *Am J Respir Crit Care Med* 179:383–389
13. Koppe C, Jendritzky G (2008) Die Auswirkungen von thermischen Belastungen auf die Mortalität. In: Lozán JL, Graßl H, Jendritzky G, Karbe L, Reise K (Hrsg) *Warnsignal Klima. Gesundheitsrisiken/Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. Wiss. Auswertungen. www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de
14. von Wichert P (2004) Bericht zu einer Stellungnahme der Kommission „Hitzetote“ der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). *Epidemiologisches Bulletin* 24
15. Flynn A, McGreevy C, Mulkerrin E (2005) Why do older patients die in a heatwave? *QJM* 98:227–229
16. Kovats RS, Hajat S (2008) Heat stress and public health: a critical review. *Annu Rev Public Health* 29:41–55
17. Gabriel KM, Endlicher WR (2011) Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environ Pollut* 159:2044–2050
18. Eis D, Helm D, Laußmann D, Stark K (2010) Klimawandel und Gesundheit. In: *Ein Sachstandsbericht*. Robert Koch-Institut, Berlin
19. Muthers S, Matzarakis A (2018) Hitzewellen in Deutschland und Europa. In: Lozán JL, Breckle S-W, Kasang D, Weisse R (Hrsg) *Warnsignal Klima: Extremereignisse*, S83–91
20. Tinz B, Freydank E, Hupfer P (2008) Hitzeepisoden in Deutschland im 20. und 21. Jahrhundert. In: Lozán J et al (Hrsg) *Warnsignal Klima Gesundheitsrisiken Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de
21. Zacharias S, Koppe C, Mücke H-G (2014) Climate change effects on heat waves and future heat wave-associated IHD mortality in Germany. *Climate* 3:100–117
22. Armstrong B, Bell ML, Coelho Md SZS et al (2017) Longer-term impact of high and low temperature on mortality: an international study to clarify length of mortality displacement. *Environ Health Perspect* 125(10):107009. <https://doi.org/10.1289/EHP1756>
23. Mazick A (2007) Monitoring excess mortality for public health action: potential for a future European network. *Eurosurveillance* 12. <https://www.eurosurveillance.org/content/10.2807/esw.12.01.03107-en>
24. Masterton J, Richardson F (1979) A method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. In: *Environment Canada*. Downsview, Ontario
25. Staiger H, Laschewski G, Grätz A (2012) The perceived temperature—a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int J Biometeorol* 56:165–176
26. Wood SN (2006) *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC, New York
27. an der Heiden M, Buchholz U (2017) Estimation of influenza-attributable medically attended acute respiratory illness by influenza type/subtype and age, Germany, 2001/02–2014/15. *Influenza Other Respir Viruses* 11:110–121
28. R Core Team (2014) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
29. Steul K, Schade M, Heudorf U (2018) Mortality during heatwaves 2003–2015 in Frankfurt-Main—the 2003 heatwave and its implications. *Int J Hyg Environ Health* 221:81–86
30. Bund/Länder Ad-hoc Arbeitsgruppe Gesundheitliche Anpassung an die Folgen des Klimawandels (2017) *Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit*. In: *Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz*. Springer, Berlin Heidelberg, S662–672