

**Originalarbeit**

# Hitzebedingte Mortalität in Deutschland zwischen 1992 und 2021

Claudia Winklmayr, Stefan Muthers, Hildegard Niemann, Hans-Guido Mücke,  
Matthias an der Heiden

Abteilung für  
Infektions-  
epidemiologie,  
Robert Koch-  
Institut (RKI), Berlin:  
Claudia Winklmayr,  
M.Sc.; Dr. rer. nat.  
Matthias an  
der Heiden

Zentrum für Medizin-  
Meteorologische  
Forschung,  
Deutscher Wetter-  
dienst (DWD),  
Freiburg: Dr. phil.-nat.  
Stefan Muthers

Abteilung für  
Epidemiologie  
und Gesundheits-  
monitoring, Robert  
Koch-Institut (RKI),  
Berlin:  
Dr.-Ing. Hildegard  
Niemann

Abteilung Umwelt-  
hygiene, Umwelt-  
bundesamt (UBA),  
Berlin: Dr. rer. nat.  
Hans-Guido Mücke

**Zusammenfassung**

**Hintergrund:** In den Jahren 2018–2020 war es ungewöhnlich warm in Deutschland, und der Sommer 2018 war der zweitwärmste Sommer seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1881. Insbesondere in höheren Altersgruppen kommt es infolge hoher Temperaturen regelmäßig zu einem Anstieg der Mortalität.

**Methode:** Wir verwendeten wöchentliche Daten zur Gesamtmortalität und mittleren Temperatur im Zeitraum 1992–2021 und schätzten die Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle in Deutschland und in den verschiedenen Regionen, unterteilt in „Norden“, „Mitte“ und „Süden“, mithilfe eines generalisierten additiven Modells (GAM). Um langfristige Trends zu charakterisieren, verglichen wir den Effekt von Hitze auf die Mortalität über die Dekaden.

**Ergebnisse:** Unsere Schätzung zeigt, dass die ungewöhnlich hohen Sommertemperaturen 2018–2020 in allen drei Jahren zu einer statistisch signifikanten Anzahl von Sterbefällen geführt haben: Es gab etwa 8 700 hitzebedingte Sterbefälle im Jahr 2018, etwa 6 900 im Jahr 2019 und etwa 3 700 im Jahre 2020. Im Jahr 2021 kam es nicht zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit aufgrund von Hitze. Im Vergleich der letzten drei Dekaden beobachten wir insgesamt einen leichten Rückgang des Effekts von hohen Temperaturen auf die Mortalität.

**Schlussfolgerung:** Trotz Hinweisen auf eine gewisse Anpassung an Hitze zeigen besonders die Daten der Jahre 2018–2020, dass Hitzeereignisse nach wie vor eine bedeutende Bedrohung für die Gesundheit der Menschen in Deutschland darstellen.

**Zitierweise**

Winklmayr C, Muthers S, Niemann H, Mücke HG, an der Heiden M: Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. Dtsch Arztebl Int 2022; 119: 451–7. DOI: 10.3238/arztebl.m2022.0202

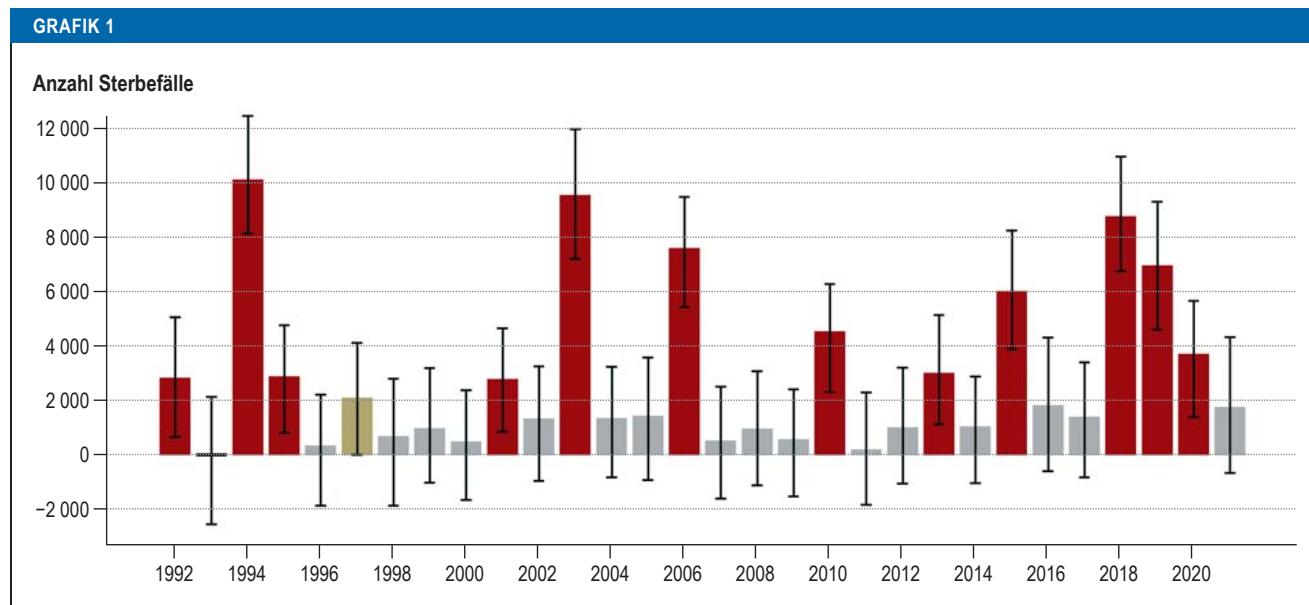
**E**xtreme Hitze und andauernde Hitzeperioden sind bedeutende Risikofaktoren für die menschliche Gesundheit. Zahlreiche Studien zeigen nicht nur, dass hohe Temperaturen zu einer erhöhten Belastung des Gesundheitssystems führen (1, 2), sondern können auch einen systematischen Zusammenhang zwischen Hitzeereignissen und einem erhöhten Mortalitätsgeschehen belegen (3–6). Für Deutschland konnte die Auswirkung von Hitze auf das Mortalitätsgeschehen sowohl für einzelne Bundesländer (7–12) als auch bundesweit (3, 13–16) quantifiziert werden.

Hohe Außentemperaturen wirken in vielfältiger Weise auf den Körper ein und können beispielsweise das Herz-Kreislauf-System stark belasten, etwa durch reduzierte Blutviskosität aufgrund des höheren Flüssigkeitsverlusts sowie durch die Herausforderung, die Körpertemperatur konstant zu halten (17, 18). Insbesondere können bestehende Beschwerden, wie etwa Atemwegserkrankungen, verstärkt werden (19, 20). Da Hitze nur in seltenen Fällen als direkte Todesursache identifiziert wird, sind statistische Verfahren erforderlich, um die Anzahl der aufgrund von Hitze verstorbenen

Personen abzuschätzen. Die vorliegende Arbeit schließt an die Modellierung der Studien zur hitzebedingten Mortalität für die Jahre 1992–2017 (3) sowie für die Jahre 2001–2015 (15) an und schätzt die Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle in den Jahren 1992 bis 2021 mithilfe eines generalisierten additiven Modells (GAM) (21).

**Methoden****Daten**

Wie in der Studie der Jahre 1992–2017 (3) verwendeten wir Daten des Statistischen Bundesamtes (StBA) zur Gesamtmortalität pro Kalenderwoche im Zeitraum 1992–2021 (22). Diese Daten sind nach vier Altersgruppen (< 65, 65–74, 75–84 und 85+ Jahre) und nach Bundesland aggregiert. Zusätzlich zogen wir die offizielle Bevölkerungsstatistik des StBA von 1992 bis 2020 heran sowie die Ergebnisse der Bevölkerungsprojektion für das Jahr 2021 (Szenario G2-L2-W2, ausgehend von moderaten Entwicklungen in Geburtenhäufigkeit, Lebenserwartung und Wanderungssaldo) (23).



**Geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle für den Zeitraum 1992–2021 in Deutschland.** Jahre mit einer signifikanten Anzahl hitzebedingter Sterbefälle (Signifikanzniveau 5 %) sind rot hervorgehoben. Jahre mit grenzsignifikanter Anzahl hitzebedingter Sterbefälle (Signifikanzniveau 10 %) sind beige hervorgehoben. Die geschätzten Anzahlen hitzebedingter Sterbefälle inklusive 95 %-Konfidenzintervallen sind außerdem in Tabelle und eTabelle gelistet.

Für die Temperaturdaten verwendeten wir stündliche Messungen der Lufttemperatur von 52 Stationen des Bodenmessnetzes des Deutschen Wetterdienstes. Diese Daten wurden zuerst über die 24 Stunden des Tages und dann über Kalenderwoche und Bundesland gemittelt. Wir betrachteten auch den bereits analysierten Zeitraum 1992–2017, einerseits, um durch den längeren Beobachtungszeitraum eine stabile Anpassung des saisonalen Musters zu gewährleisten, und andererseits, um die Vergleichbarkeit mit früheren Schätzungen zu ermöglichen. Wie zuvor analysierten wir nur das Sommerhalbjahr (Kalenderwochen 15–40) und unterschieden drei Dekaden: 1992–2001, 2002–2011 und 2012–2021. Außerdem gruppierten wir die Bundesländer in drei große Regionen: „Norden“ (Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein), „Mitte“ (Berlin, Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Hessen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) und „Süden“ (Baden-Württemberg, Bayern). Dadurch konnten auch regionale Besonderheiten der Wirkung hoher Temperaturen auf die Mortalität berücksichtigt werden.

### Modell

Wir verwendeten ein generalisiertes additives Modell (GAM) (21) sowie die Statistiksoftware R (Version 4.0.5, package „mgcv“ [24]), um den beobachteten Verlauf der Gesamt mortalität im Studienzeitraum nachzubilden. Für jede Region und Altersgruppe setzt sich der nachgebildete Verlauf zusammen aus einem Langzeit-trend, einem saisonal wiederkehrenden Muster sowie Expositionen-Wirkungskurven, die den relativen Einfluss

der mittleren Temperatur auf die Mortalität der gleichen Woche und der drei folgenden Wochen quantifizieren.

Ausgehend von den Expositionen-Wirkungskurven identifizierten wir für jede Altersgruppe, Region und Dekade einen Temperatur-Schwellenwert, oberhalb dessen die Temperatur relevant auf die Mortalität einwirkt. Eine Kalenderwoche, deren Mitteltemperatur oberhalb des Schwellenwerts liegt, bezeichnen wir als „Hitzewoche“, zusammenhängende Zeiträume von Hitzewochen als „Hitzeperioden“. Da diese Schwellenwerte in der Nähe von 20 °C liegen, gebrauchen wir gelegentlich auch diesen Wert als Kennzeichen einer Hitzewoche.

Als „Hintergrundmortalität“ bezeichnen wir die Mortalität, die zu erwarten wäre, wenn die Wochenmitteltemperatur stets unterhalb des Schwellenwerts verbliebe. Die Differenz zwischen dem modellierten Mortalitätsverlauf und der Hintergrundmortalität ergibt die „hitzebedingte Mortalität“. Liegt das 95 %-Konfidenzintervall der geschätzten hitzebedingten Mortalität vollständig über Null, so sprechen wir von einer signifikanten Anzahl hitzebedingter Sterbefälle. Für eine detaillierte Beschreibung der Modellierung und der durchgeführten Sensitivitätsanalysen siehe eSupplement „Methoden“ und (3).

### Ergebnisse

#### Hitzebedingte Sterbefälle

Grafik 1 zeigt die geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle in Deutschland für den Zeitraum 1992–2021. In den Jahren 2018–2020 treten zum ersten Mal innerhalb des Untersuchungszeitraums in drei aufeinanderfolgenden Jahren signifikante Anzahlen hitze-

bedingter Sterbefälle auf. Insbesondere das Jahr 2018 liegt mit einer geschätzten Anzahl von etwa 8 700 hitzebedingten Sterbefällen in einer ähnlichen Größenordnung wie die historischen Hitzejahre 1994 und 2003 (jeweils rund 10 000 Sterbefälle). Für die Jahre 2019 und 2020 schätzt das Modell etwa 6 900 beziehungsweise 3 700 Sterbefälle. Die Anzahlen von Sterbefällen sind vergleichbar mit jenen in den Jahren 2006, 2010 und 2015. Für das Jahr 2021 wurde keine signifikant erhöhte hitzebedingte Sterblichkeit ermittelt. Die geschätzten Sterbefallzahlen und Konfidenzintervalle für die Dekade 2012–2021 sind auch in der *Tabelle* zusammengefasst, die Ergebnisse für den gesamten Zeitraum seit 1992 finden sich in der *eTabelle*.

*Grafik 2* zeigt den zeitlichen Mortalitätsverlauf (Sterbefälle pro 100 000 Einwohner) der Jahre 2018–2021. Vor allem in den Jahren 2018–2020 liegt die nachgebildete und die beobachtete Gesamt mortalität deutlich über der modellierten Hintergrundmortalität.

Die *eGrafiken 1* und *2* zeigen eine feinere Aufschlüsselung des Mortalitätsverlaufs nach den drei Regionen Norden, Mitte und Süden sowie einen Vergleich der hitzebedingten Mortalität nach Region und Altersgruppe. In Übereinstimmung mit bisherigen Ergebnissen (3, 9, 15) wird dort deutlich, dass in allen Regionen die Altersgruppe über 85 Jahre am stärksten betroffen ist. In der Region Norden fallen die Hitzeperioden der Jahre 2018 und 2020 kürzer aus, dennoch kam es in diesen Jahren zu einer hohen Anzahl von hitzebedingten Sterbefällen.

*Grafik 3* zeigt den Verlauf der Expositions-Wirkungskurven der aktuellen Woche und der Vorwoche für die Altersgruppe über 85 Jahre in den drei Regionen Norden, Mitte und Süden. Hier wird deutlich, dass der Temperaturschwellenwert, ab dem von einer relevanten Einwirkung der Hitze auf die Mortalität gesprochen werden kann, im Norden etwas niedriger ausfällt ( $19,7^{\circ}\text{C}$ ) als in den Regionen Mitte ( $20,2^{\circ}\text{C}$ ) oder Süden ( $20,8^{\circ}\text{C}$ ). Zusätzlich verzeichnen die Expositions-Wirkungskurven der aktuellen Woche und der Vorwoche im Norden einen deutlich steileren Anstieg für Temperaturen oberhalb des Schwellenwerts. Es zeigt sich also eine von Süden nach Norden hin regional zunehmende Wirkung von Hitze auf die Mortalität, sodass die für eine bestimmte Wochenmitteltemperatur erwartete Anzahl hitzebedingter Sterbefälle (pro 100 000 Einwohnern derselben Altersgruppe) im Norden etwas höher und im Süden etwas niedriger als in der Mitte Deutschlands ausfällt.

### Veränderungen in der Schätzung der Expositions-Wirkungskurven

*Grafik 4* zeigt die Expositions-Wirkungskurven der Altersgruppe über 85 Jahre, aufgeteilt nach geografischer Region und Dekade. Insgesamt ist für Wochenmitteltemperaturen über  $20^{\circ}\text{C}$  eine deutliche Erhöhung der Mortalitätsrate zu beobachten. Im Verlauf der Dekaden ist insbesondere in der Region Mitte ein leichtes Abflachen der Kurven zu beobachten, das heißt dieselbe Wochenmitteltemperatur führt im Zeitraum 2012–2021 zu einer weniger starken Erhöhung der Mortalität als beispielsweise im Zeitraum

TABELLE

**Geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle inklusive 95-%-Konfidenzintervalle für die Jahre 2012–2021\***

Jahr	geschätzte Zahl hitzebedingter Sterbefälle [95-%-Konfidenzintervall]
2012	1 000 [-1 100; 3 200]
<b>2013</b>	<b>3 000 [1 100; 5 100]</b>
2014	1 000 [-1 100; 2 900]
<b>2015</b>	<b>6 000 [3 900; 8 200]</b>
2016	1 800 [-600; 4 300]
2017	1 400 [-800; 3 400]
<b>2018</b>	<b>8 700 [6 700; 10 900]</b>
<b>2019</b>	<b>6 900 [4 600; 9 300]</b>
<b>2020</b>	<b>3 700 [1 400; 5 600]</b>
2021	1 700 [-700; 4 300]

\*Fett gedruckte Werte sind statistisch signifikant.

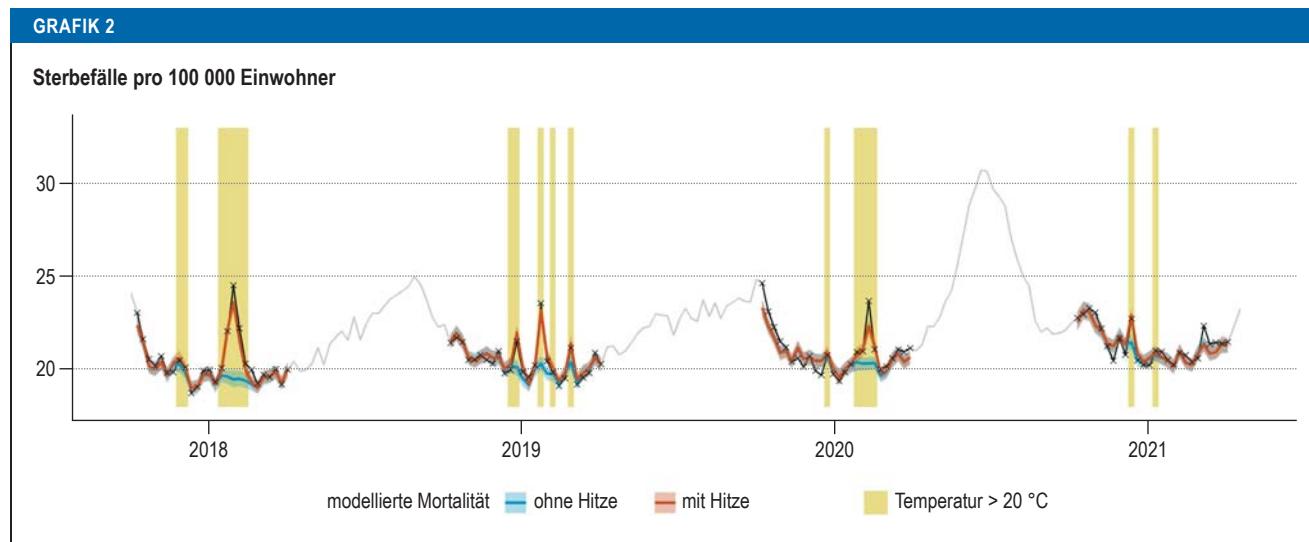
1992–2001. Eine Zusammenfassung der Expositionswirkungskurven der verschiedenen Regionen und Altersgruppen findet sich im *eSupplement „Analyse“*.

### Besonderheiten der Jahre 2018–2020 und Einfluss der Hitzedauer

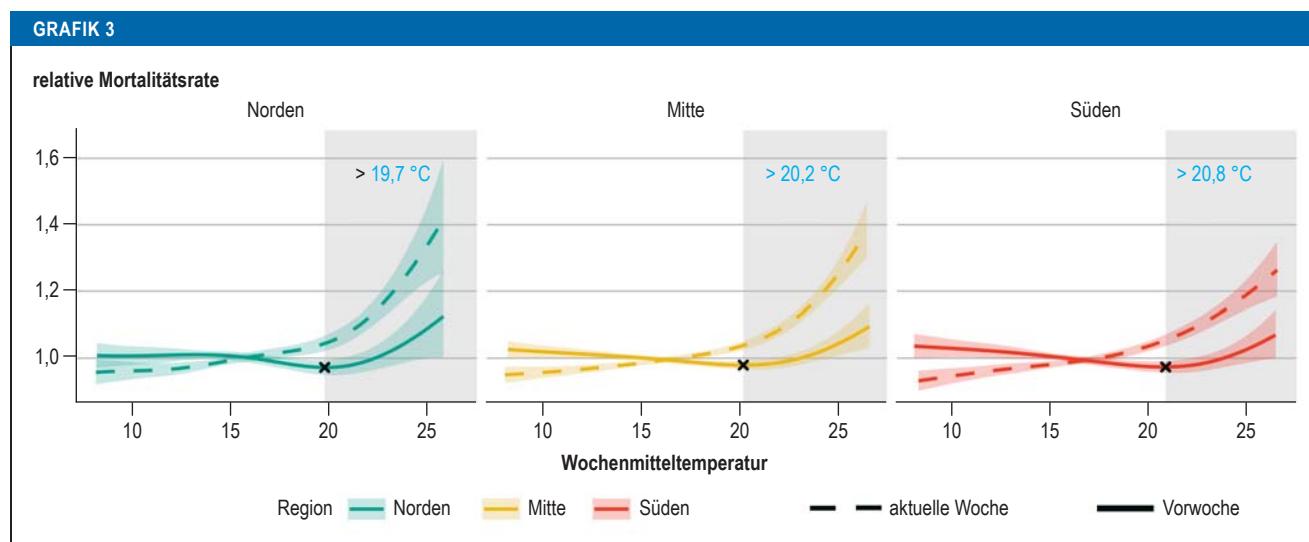
*Grafik 2* und *eGrafik 1* zeigen, dass das Modell den Mortalitätsverlauf im Allgemeinen gut nachbilden kann. Allerdings wird die Mortalität während der Hitzeperioden 2018 und 2020 etwas unterschätzt, im Jahr 2019 dagegen leicht überschätzt. Eine mögliche Erklärung dafür liegt im unterschiedlichen Charakter der Hitzeperioden dieser drei Jahre.

Das Jahr 2018 zeichnete sich in allen drei Regionen durch eine ungewöhnlich lange Hitzeperiode aus (bis zu neun Wochen in der Region Süden und bis zu fünf Wochen in den Regionen Norden und Mitte). Zusätzlich wurden in diesem Zeitraum auch auffallend hohe Wochenmitteltemperaturen (bis zu  $26,6^{\circ}\text{C}$  in den Regionen Mitte und Süden, bis zu  $25,1^{\circ}\text{C}$  im Norden) gemessen. Im Jahr 2019 wurden zwar ebenfalls sehr hohe Temperaturen gemessen (maximal  $25,8^{\circ}\text{C}$  in der Region Mitte,  $25,7^{\circ}\text{C}$  im Süden und  $25^{\circ}\text{C}$  im Norden), die Hitzeperioden wurden aber immer wieder von Wochen mit niedrigerer Temperatur unterbrochen. Im Jahr 2020 lässt sich schließlich wieder eine langandauernde Hitzeperiode (bis zu fünf Wochen in den Regionen Mitte und Süden, bis zu drei Wochen im Norden) beobachten, die maximale Wochenmitteltemperatur lag jedoch deutlich niedriger als im Jahr 2018 (maximale Wochenmitteltemperatur  $24,9^{\circ}\text{C}$ ).

Eine explizite Berücksichtigung der Hitzedauer in der Modellierung wurde untersucht, führt aber nicht zu einer wesentlich verbesserten Beschreibung der beobachteten Daten. Eine detaillierte Zusammenfassung der wichtigsten Temperaturkennzahlen im Untersuchungszeitraum findet sich im *eSupplement „Daten“*.



Verlauf der Mortalität (Sterbefälle pro 100 000 Einwohner) in den Jahren 2018–2021. Die graue Linie zeigt die gemeldete Gesamt mortalität, die rote Linie zeigt die vom Modell geschätzte Mortalität (nur im Sommerhalbjahr) und die blaue Linie zeigt die geschätzte Hintergrundmortalität (erwartete Mortalität ohne Hitze). Wochen, in denen die Wochenmitteltemperatur (gemittelt über alle Bundesländer) 20 °C übersteigt, sind gelb hinterlegt. Die leicht erhöhte Gesamt mortalität im Frühjahr 2020 sowie die stark erhöhte Gesamt mortalität im Winter 2020/21 sind auf die erste und zweite Welle der COVID-19-Pandemie zurückzuführen. Eine regionale Aufschlüsselung der Zeitreihe findet sich in eGrafik 1.

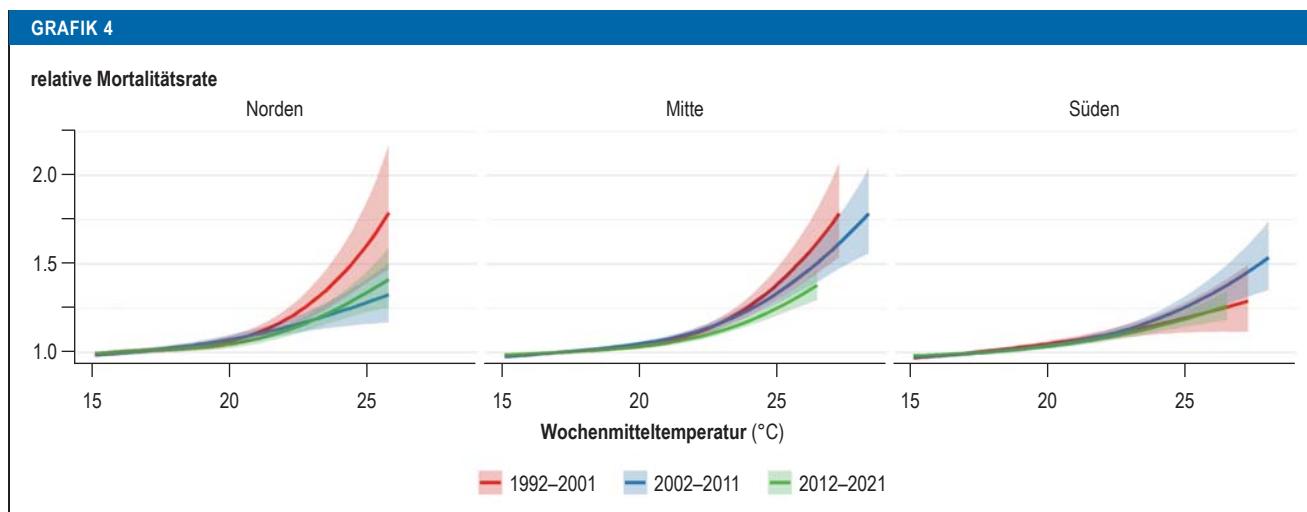


Exposition-Wirkungskurven der aktuellen Woche (gestrichelte Linie) und der Vorwoche (durchgezogenen Linie) für die Altersgruppe 85+ im Zeitraum 2012–2012, aufgeteilt nach den drei Regionen „Norden“, „Mitte“ und „Süden“. Das Minimum der Exposition-Wirkungskurve der Vorwoche ist jeweils mit einem schwarzen „x“ hervorgehoben und kennzeichnet den Temperaturschwellenwert, ab dem sowohl die Temperatur der Vorwoche als auch die Temperatur der aktuellen Woche zu einem Anstieg der Mortalitätsrate führen. Temperaturbereiche oberhalb des Schwellenwerts sind grau hinterlegt. Der Temperaturschwellenwert steigt von Norden nach Süden an.

### Diskussion

Die Jahre 2018–2020 weisen jeweils mehr Hitzewochen auf als die anderen Jahre der Dekade 2012–2021. Das Jahr 2018 sticht besonders hervor, da nicht nur überdurchschnittlich lange andauernde Hitzeperioden auftraten, sondern auch besonders hohe Temperaturen gemessen wurden. Die Dauer und Anzahl der Hitzeperioden unterscheiden sich allerdings deutlich zwischen den Regionen, siehe auch eSupplement „Daten“. Auch die hitzebedingte Mortalität liegt in den Jahren 2018–2020

deutlich über den Werten der anderen Jahre der Dekade. Im Jahr 2018 ist die geschätzte Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle vergleichbar mit den historischen Hitzejahren 1994 und 2003. Allerdings zeigt eine direkte Gegenüberstellung der Mortalität in den einzelnen Wochen, dass bei vergleichbaren Temperaturen im Jahr 2018 weniger Sterbefälle auftraten als 1994 und 2003 (eSupplement „Analyse“). Im Jahr 2021 waren nur einzelne Hitzewochen zu beobachten, die nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Gesamt mortalität geführt haben.



**Trend der Exposition-Wirkungskurven über die Dekaden für die drei Regionen „Norden“, „Mitte“ und „Süden“.** Dargestellt sind Ergebnisse für die Altersgruppe 85+, da dort die stärksten Effekte zu beobachten sind. Die drei Dekaden 1992 bis 2001 (rot), 2002–2011 (blau) und 2012–2021 (grün) zeigen einen leicht abfallenden Trend, der besonders deutlich in der Region „Mitte“ zu sehen ist. Da Wochenmitteltemperaturen über 25 °C in der Region „Norden“ deutlich seltener auftreten, sind die Schätzungen in diesem Bereich mit größerer Unsicherheit behaftet, was sich an den breiteren Konfidenzintervallen zeigt.

## **Einfluss der Jahre 2018–2020 auf die Gesamtdekade**

Da die Expositions-Wirkungskurven pro Dekade geschätzt werden, führt die Inklusion der vergleichsweise heißen Jahre 2018–2020 zu einer Neuschätzung der Expositions-Wirkungskurven der Dekade 2012–2021, die im Vergleich mit dem Modell auf Basis der Daten bis 2017 (3) einen steileren Anstieg verzeichnen. Dies impliziert, dass auch die geschätzte Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle für diese Dekade leicht nach oben korrigiert werden muss. Die aktualisierten Schätzwerte liegen im Rahmen der 95%-Konfidenzbereiche der früheren Schätzung (*eSupplement „Analyse“*).

## Dauer von Hitzeperioden

Eine Berücksichtigung der Dauer von Hitzeperioden führte nur zu geringfügigen Verbesserungen der Modellpassung und nicht zu signifikanten Veränderungen in den Schätzungen der hitzebedingten Sterbefälle. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass Kalenderwochen als Untersuchungseinheit zu grob sind, um den zeitlichen Verlauf einer lang anhaltenden Hitzeperiode vollständig zu erfassen. Insbesondere ein Wechsel zwischen heißen und kühleren Tagen innerhalb einer Woche sowie die Stärke der nächtlichen Abkühlung können auf Basis wöchentlicher Werte nicht eindeutig differenziert werden, sodass zum Beispiel die Dauer einer Hitzeperiode in den wöchentlichen Daten tendenziell überschätzt wird (*eSupplement „Daten“*). Die Untersuchung tagesgenauer Mortalitätsdaten könnte dabei helfen, eine optimale Zeiteinheit zu identifizieren.

Schließlich könnten auch andere Phänomene abgesehen von der Temperatur eine Rolle spielen, etwa das Auftreten und die Konzentration von Luftschadstoffen, die Luftfeuchtigkeit und möglicherweise auch die Lage einer Hitzeperiode im Kalenderjahr.

(25). So wurde beispielsweise in (26) gezeigt, dass der Mortalitätsverlauf während der ersten Tage der Hitzewellen 2003 und 2015 trotz vergleichbarer Temperaturverläufe starke Unterschiede aufwies. Erklären ließen sich die Unterschiede mit der deutlich höheren Luftfeuchtigkeit während der Hitzewelle 2015.

#### Vergleich mit anderen Modellen

Einzelne Bundesländer, zum Beispiel Hessen (10), Baden-Württemberg (11), Berlin und Brandenburg (27), veröffentlichen regelmäßige Schätzungen der Anzahl hitzebedingter Sterbefälle. Die Hintergrundmortalität wird in diesen Modellen mithilfe der durchschnittlichen Mortalität der Vorjahre berechnet, wobei Zeiträume mit bekannten Hitzeereignissen ausgeschlossen werden. Diese Modelle haben gegenüber der hier verwendeten Modellierung den Vorteil der vereinfachten Handhabung, da sie auch ohne spezielle Statistiksoftware ausgewertet werden können. Andrerseits stehen sie vor der Problematik, dass die zunehmende Frequenz extremer Hitzeereignisse den Ausschluss immer größerer Zeiträume bedingt, was zu einer Verzerrung der geschätzten Hintergrundmortalität führen kann. Außerdem kann der Expositionswirkungszusammenhang nicht direkt quantifiziert werden, weshalb Temperatur-Schwellenwerte und Anpassungsprozesse auf anderem Wege beschrieben werden müssen.

Das Thema hitzebedingte Mortalität rückt auch zunehmend in den Fokus internationaler Untersuchungen. So wurde etwa im Jahr 2020 der Indikator „heat-related mortality“ in den „Lancet Countdown on health and climate change“ aufgenommen. Weltweit wurde die Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle im Jahr 2018 mit 296 000 beziffert, von denen allein 20 000 auf Deutschland entfallen (6). Allerdings wurde für diese Schätzung

eine weltweit einheitliche Expositions-Wirkungskurve angenommen und auch saisonale Unterschiede in der Mortalität wurden nur pauschal berücksichtigt. Eine solche vereinfachte Herangehensweise erlaubt zwar, die weltweite Größenordnung der hitzebedingten Mortalität einzuschätzen, kann aber für einzelne Staaten zu deutlichen Über- beziehungsweise Unterschätzungen führen (zur Bedeutung regionaler Unterschiede in den Expositions-Wirkungszusammenhängen siehe auch [28]).

### Anpassung an Hitzeperioden in Deutschland

Die in *Grafik 4* dargestellte Entwicklung der Expositions-Wirkungskurven im Verlauf der Dekaden zeigt, dass im Allgemeinen dieselbe Wochenmitteltemperatur in der Dekade 2012–2021 weniger stark auf die Mortalität einwirkt als etwa in der Dekade 1992–2001. Dies kann als Hinweis auf eine gewisse Anpassung der Bevölkerung an wiederkehrende Hitzeperioden interpretiert werden.

Die von uns analysierten Daten erlauben keine Rückschlüsse auf die Ursachen dieser begrenzten Anpassung. Denkbar sind zum Beispiel individuelle Verhaltensänderungen durch stärkere Sensibilisierung, wie etwa das Tragen luftiger Kleidung, ausreichende Flüssigkeitszufuhr oder das Aufsuchen schattiger oder klimatisierter Räume (29). Information zu Hitzeereignissen erfolgt beispielsweise auch über das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes (30).

Da ältere Menschen und Menschen mit Vorerkrankungen besonders betroffen sind, steht das Thema Hitzeprävention im Gesundheits- und Pflegewesen auf der Basis erster Umsetzungserfahrungen weiter im Fokus (2). Um Anpassungsstrategien auf Ebene der Kommunen zu initiieren, ist die Koordination und fachübergreifende Interaktion essentiell (31, 32). Hierzu betonte die Gesundheitsministerkonferenz 2020 in ihrem entsprechenden Beschluss die Erfordernis von Hitzeaktionsplänen, mit dem Hinweis diese bis 2025 zu erstellen (33).

### Ausblick

Zahlreiche Untersuchungen gehen davon aus, dass durch den Klimawandel auch in Deutschland vermehrt mit extremen Hitzeereignissen mit teilweise drastischen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit gerechnet werden muss (4, 20, 34–38). Die Untersuchung der hitzebedingten Mortalität stellt dabei einen wesentlichen Beitrag zur Einschätzung gesundheitlicher Risiken dar. Die Aktualisierung unserer Analyse zeigt erstmalig in drei aufeinanderfolgenden Jahren signifikant Anzahlen hitzebedingter Sterbefälle und verdeutlicht damit noch einmal, dass Hitzeereignisse weiterhin eine ernst zunehmende Bedrohung für die Gesundheit der Menschen in Deutschland sind. Insgesamt bestehen nach wie vor die Notwendigkeit und Herausforderung, den Umgang mit Hitzeperioden in Deutschland deutlich zu verbessern und vulnerable Bevölkerungsgruppen adäquat zu schützen.

### Förderung

Diese Arbeit ist im Rahmen des Projekts „DAS: Weiterentwicklung und Harmonisierung des Indikators zur hitzebedingten Übersterblichkeit in Deutschland“ (FKZ 3720 48 203 1) entstanden und wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) gefördert und im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) durchgeführt.

### Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

### Manuskriptdaten

eingereicht: 21.12.2021, revidierte Fassung angenommen: 13.04.2022.

### Literatur

- Bunker A, Wildenhain J, Vandenberghe A, et al.: Effects of air temperature on climate-sensitive mortality and morbidity outcomes in the elderly; a systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. *EBioMedicine* 2016; 6: 258–68.
- Herrmann A, Haefeli WE, Lindemann U, Rapp K, Roigk P, Becker C: Epidemiology and prevention of heat-related adverse health effects on elderly people. *Z Gerontol Geriatr* 2019; 52: 487–502.
- an der Heiden M, Muthers S, Niemann H, Buchholz U, Grabenhenrich L, Matzarakis A: Heat-related mortality: an analysis of the impact of heatwaves in Germany between 1992 and 2017. *Dtsch Arztebl Int* 2020; 117: 603–9.
- Eis D, Helm D, Laußmann D, Stark K: Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. *DAZ* 2008; 148: 66–71.
- Gasparini A, Armstrong B: The impact of heat waves on mortality. *Epidemiology* 2011; 22: 68–73.
- Watts N, Arnann M, Arnell N, et al.: The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *Lancet* 2021; 397: 129–70.
- Breitner S, Wolf K, Peters A, Schneider A: Short-term effects of air temperature on cause-specific cardiovascular mortality in Bavaria, Germany. *Heart* 2014; 100: 1272–80.
- Rai M, Breitner S, Wolf K, Peters A, Schneider A, Chen K: Impact of climate and population change on temperature-related mortality burden in Bavaria, Germany. *Environ Res Lett* 2019; 14.
- an der Heiden M, Buchholz U, Uphoff H: Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle und Betrachtung der Exzess-Mortalität; Berlin und Hessen, Sommer 2018. *Epid Bull* 2019; 23: 193–7.
- Siebert H, Uphoff H, Grewe HA: Monitoring heat-related mortality in Hesse. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 2019; 62: 580–8.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg.: Baden-Württemberg: Annähernd 1700? „Hitzeotote“ im Sommer 2019. 2020. [www.statistik-bw.de/Presse/Pressemeldungen/2020171](http://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemeldungen/2020171) (last accessed on 12 May 2022).
- Huber V, Krummenauer L, Peña-Ortiz C, et al.: Temperature-related excess mortality in German cities at 2 °C and higher degrees of global warming. *Environ Res* 2020; 186: 109447.
- Zacharias S, Koppe C, Mücke HG: Climate change effects on heat waves and future heat wave-associated IHD mortality in Germany. *Climate* 2015; 3: 100–17.
- Zacharias S, Koppe C, Mücke HG: Influence of heat waves on ischemic heart diseases in Germany. *Climate* 2014; 2: 133–52.
- an der Heiden M, Muthers S, Niemann H, Buchholz U, Grabenhenrich L, Matzarakis A: Estimation of heat-related deaths in Germany between 2001 and 2015. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 2019; 571–9.
- Karlsson M, Ziebarth N: Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: comprehensive evidence from Germany. *J Environ Econ Manage* 2018; 91: 93–117.
- Havenith G: Temperature regulation, heat balance and climatic stress. In: Extreme weather events and public health responses. Berlin, Heidelberg: Springer 2005; 69–80.
- Keatinge WR, Coleshaw SRK, Easton JC, Cotter F, Mattock MB, Chelliah R: 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* 1986; 81: 795–800.
- Michelozzi P, Accetta G, De Saris M, et al.: High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities. *Am J Respir Crit Care Med* 2009; 179: 383–9.
- Schlegel I, Muthers S, Matzarakis A: Einfluss des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen. 2021. [www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/einfluss-des-klimawandels-auf-die-morbiditaet](http://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/einfluss-des-klimawandels-auf-die-morbiditaet) (last accessed on 12 May 2022).

21. Wood SN: Generalized additive models: An introduction with R. Second edition. New York: Chapman and Hall/CRC. 2006.
22. Statistisches Bundesamt (Destatis): Sonderauswertung Sterbefälle. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Sterbefaelle-Lebenserwartung/Tabellen/sonderauswertung-sterbefaelle.html. (last accessed on 12 May 2022).
23. Statistisches Bundesamt (Destatis): Bevölkerung im Wandel. Annahmen und Ergebnisse der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. 2019. www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2019/Bevoelkerung/pressebroschuer-bevoelkerung.pdf?\_\_blob=publicationFile (last accessed on 12 May 2022).
24. R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria 2017. www.r-project.org/ (last accessed on 12 May 2022).
25. Ragettli MS, Röösli M: Gesundheitliche Auswirkungen von Hitze in der Schweiz und die Bedeutung von Präventionsmaßnahmen. Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut: Schlussbericht Juli 2020. www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/documents/website/sektoren/gesundheit/swisstph\_2020-gesundheitliche-auswirkungen-von-hitze-2019-vergleich.pdf.download.pdf/SwissTPH\_2020\_Gesundheitliche\_Auswirkungen\_von\_Hitze\_2019\_Vergleich\_2003–2015–2018\_def.pdf (last accessed on 12 May 2022).
26. Muthers S, Laschewski G, Matzarakis A: The summers 2003 and 2015 in South-West Germany: heat waves and heat-related mortality in the context of climate change. *Atmosphere (Basel)* 2017; 8: 224.
27. Axnick M: Hitzebedingte Sterblichkeit in Berlin und Brandenburg. *Zeitschrift für amtliche Stat Berlin Brand* 2021: 34–9.
28. Vicedo-Cabrera AM, Sera F, Gasparrini A: Hands-on tutorial on a modeling framework for projections of climate change impacts on health. *Epidemiology* 2019; 30: 321–9.
29. Gosling SN, Hondula DM, Bunker A, et al.: Adaptation to climate change: a comparative analysis of modeling methods for heat-related mortality. *Environ Health Perspect* 2017; 125: 1–14.
30. Matzarakis A, Laschewski G, Muthers S: The heat healthwarning system in Germany—application and warnings for 2005 to 2019. *Atmosphere (Basel)* 2020; 11: 1–13.
31. Kaiser T, Kind C, Dudda L, Sander K: Klimawandel, Hitze und Gesundheit: Stand der gesundheitlichen Hitzevorsorge in Deutschland und Unterstützungsbedarf der Bundesländer und Kommunen. Climate change, heat and health: status of heat prevention in Germany and need for support of federal states. *UMID – Umwelt + Mensch Informationsdienst* 01/2021, 27–37.
32. Blättner B, Janson D, Grewe HA: Heat-health action plans in the parliaments of the German federal states: political discourses on health protection and climate change. *Prävention und Gesundheitsförderung* 2020; 15: 296–302.
33. Gesundheitsministerkonferenz: TOP: 5.1 Der Klimawandel – eine Herausforderung für das deutsche Gesundheitswesen. 2020. www.berlin.de/sen/archiv/gpg-2016–2021/2020/pressemitteilung.998587.php (last accessed on 12 May 2022).
34. Christidis N, Jones G, Stott P: Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nat Clim Chang* 2015; 5: 46–50.
35. Deutschländer T, Mächel H: Temperatur inklusive Hitzewellen. In: *Klimawandel in Deutschland*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2017; 47–56.
36. Kahlenborn W, Porst L, Voß M, et al.: Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. 2021. www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung (last accessed on 12 May 2022).
37. Vicedo-Cabrera AM, Scovronick N, Sera F, et al.: The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat Clim Chang* 2021; 11: 492–500.
38. Mücke HG, Litvinovitch J: Heat extremes, public health impacts, and adaptation policy in Germany. *Int J Environ Res Public Health* 2020; 17: 7862.

**Anschrift für die Verfasser**

Claudia Winklmayr, M.Sc.  
Abteilung für Infektionsepidemiologie  
Robert Koch-Institut  
Nordufer 20, 13353 Berlin  
winklmayr@rki.de

**Zitierweise**

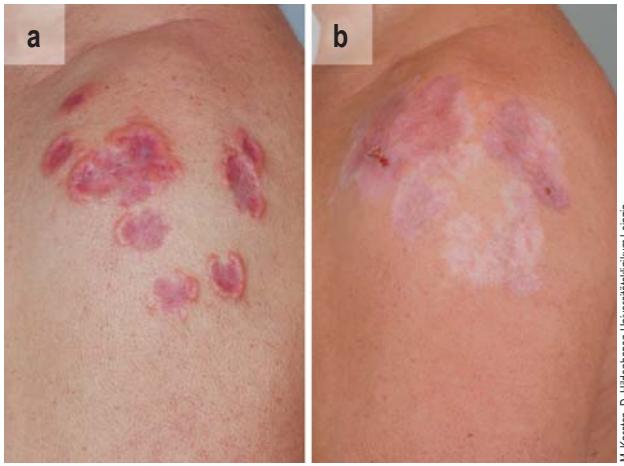
Winklmayr C, Muthers S, Niemann H, Mücke HG, an der Heiden M: Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. *Dtsch Arztebl Int* 2022; 119: 451–7. DOI: 10.3238/arztebl.m2022.0202

► Die englische Version des Artikels ist online abrufbar unter: [www.aerzteblatt-international.de](http://www.aerzteblatt-international.de)

**Zusatzmaterial**  
**eTabelle, eGrafiken, eSupplement:**  
[www.aerzteblatt.de/m2022.0202](http://www.aerzteblatt.de/m2022.0202) oder über QR-Code



## KLINISCHER SCHNAPPSCHUSS



### Syphilitische kutane Gummata

Ein 54-jähriger Patient stellte sich mit persistierenden anulären Plaques vor, die ausschließlich an beiden Oberarmen auftraten. Die Herde zeigten eine erhabene indurierte Begrenzung und zentrale Atrophie (Abbildung a, 03/2018). Die Biopsie deutete mit zahlreichen Makrophagen, mehrkernigen Riesenzellen, Lymphozyten und Plasmazellen auf ein infektiöses Geschehen hin. Serologisch wurde eine Syphilis nachgewiesen (mit positivem Treponema-pallidum-Partikel-Agglutinations-Test und Westernblot). Der Patient erhielt intramuskuläre Injektionen von 2,4 Mio Einheiten Tardocillin/Tag 1, die an Tag 8 und 15 wiederholt wurden. Die Gummata heilten unter Bildung größerer hypopigmentierter Narben ab (Abbildung b, 02/2019). Der serologische Titer der Cardiolipin-Antikörper (VDRL-Test) war sechs Wochen später deutlich gesunken. Sobald die Diagnose einer tertären Syphilis mit kutanen Gummata gestellt wird, sollten weitere Organbeteiligungen ausgeschlossen werden (kardiovaskuläre, neurologische Beteiligung, Augen, Leber, Knochen, Gelenke). Die Inzidenz ist in Deutschland auf mehr als 9 Meldungen pro 100 000 Einwohner pro Jahr gestiegen. Die Mortalität liegt unbehandelt bei bis zu 50–60 %. Eine Kontaktverfolgung wird angeraten, insbesondere in Bezug auf kongenitale Syphilisinfektionen.

**Dr. med. Robin Reschke, Prof. Dr. med. Manfred Kunz, PD Dr. med. Mirjana Ziemer**, Klinik und Poliklinik für Dermatologie, Venerologie und Allergologie, Universitätsklinikum Leipzig, robin.reschke@medizin.uni-leipzig.de

**Interessenkonflikt:** Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

**Zitierweise:** Reschke R, Kunz M, Ziemer M: Gummatous cutaneous syphilis. *Dtsch Arztebl Int* 2022; 119: 457. DOI: 10.3238/arztebl.m2022.0050

► Vergrößerte Abbildung und englische Übersetzung unter: [www.aerzteblatt.de](http://www.aerzteblatt.de)

**Zusatzmaterial zu:****Hitzebedingte Mortalität in Deutschland zwischen 1992 und 2021**

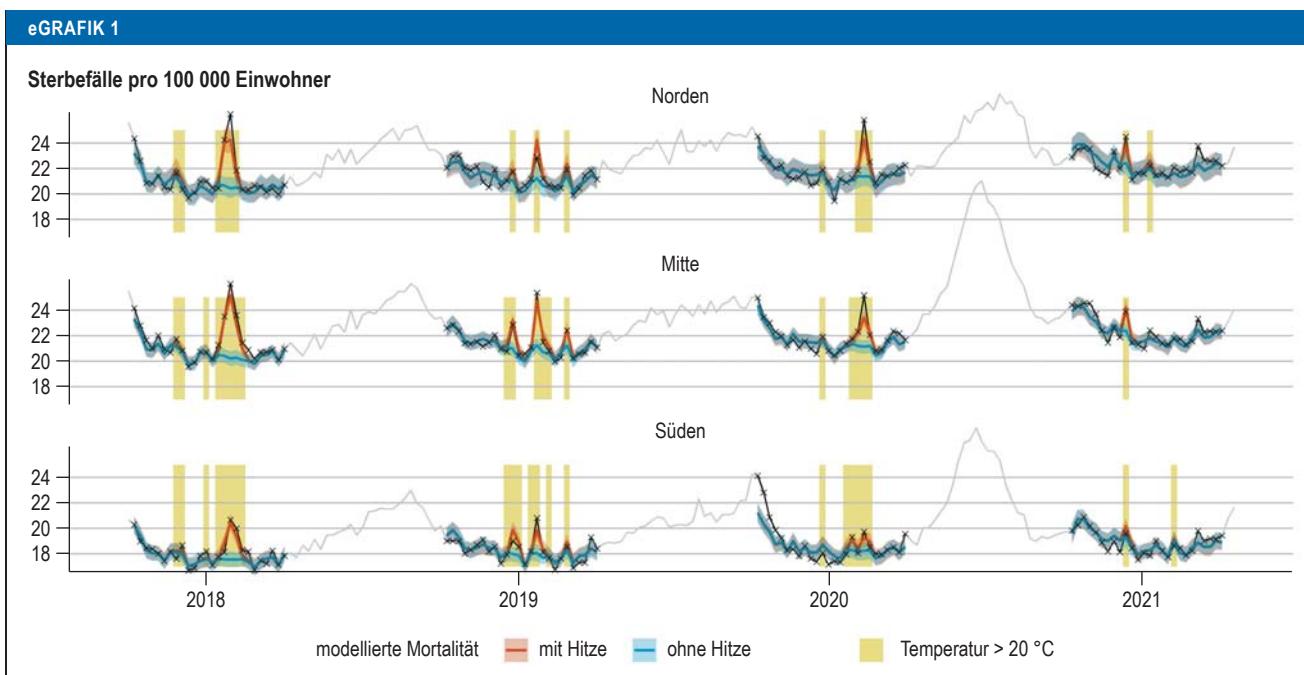
Claudia Winklmayr, Stefan Muthers, Hildegard Niemann, Hans-Guido Mücke, Matthias an der Heiden

Dtsch Arztebl Int 2022; 119: 451–7. DOI: 10.3238/arztebl.m2022.0202

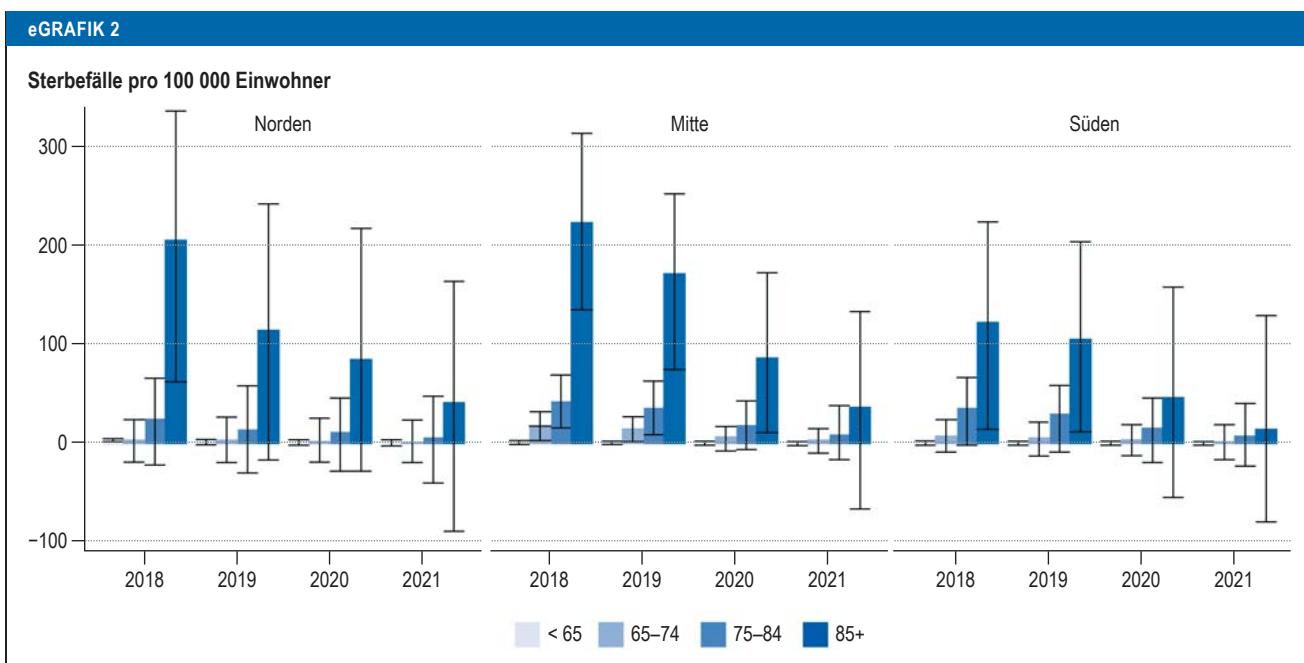
**eTABELLE****Geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle inklusive 95 %-Konfidenzintervall für die Jahre 1992–2021\***

Jahr	geschätzte Zahl hitzebedingter Sterbefälle [95 %-Konfidenzintervall]
1992	<b>2 800 [600; 5 000]</b>
1993	0 [-2 600; 2 100]
1994	<b>10 100 [8 100; 12 400]</b>
1995	<b>2 800 [800; 4 700]</b>
1996	300 [-1 900; 2 200]
1997	2 100 [0; 4 100]
1998	600 [-1 900; 2 800]
1999	900 [-1 000; 3 200]
2000	400 [-1 700; 2 400]
2001	<b>2 700 [800; 4 600]</b>
2002	1 300 [-1 000; 3 200]
2003	<b>9 500 [7 200; 12 000]</b>
2004	1 300 [-800; 3 200]
2005	1 400 [-900; 3 600]
2006	<b>7 500 [5 400; 9 500]</b>
2007	500 [-1 600; 2 500]
2008	900 [-1 100; 3 100]
2009	500 [-1 600; 2 400]
2010	<b>4 500 [2 300; 6 300]</b>
2011	100 [-1 900; 2 300]
2012	1 000 [-1 100; 3 200]
2013	<b>3 000 [1 100; 5 100]</b>
2014	1 000 [-1 100; 2 900]
2015	<b>6 000 [3 900; 8 200]</b>
2016	1 800 [-600; 4 300]
2017	1 400 [-800; 3 400]
2018	<b>8 700 [6 700; 10 900]</b>
2019	<b>6 900 [4 600; 9 300]</b>
2020	<b>3 700 [1 400; 5 600]</b>
2021	1 700 [-700; 4 300]

\* Fett gedruckte Werte sind statistisch signifikant.



**Zeitreihe der Mortalität (Sterbefälle pro 100 000 Einwohner)** für die Jahre 2018–2021, aufgeteilt nach den Regionen Norden, Mitte und Süden. Die graue Linie zeigt die gemeldete Gesamtmortalität, die rote Linie zeigt die vom Modell geschätzte Mortalität (nur im Sommerhalbjahr) und die blaue Linie zeigt die geschätzte Hintergrundmortalität. Wochen, in denen die Wochenmitteltemperatur (gemittelt über alle Bundesländer) 20 °C übersteigt, sind gelb hinterlegt. In den Jahren 2018 und 2020 fällt die kürzere Dauer der Hitzeperioden in der Region Norden auf. Die erhöhte Mortalität im Frühling 2020 in der Region Süden ist auf die erste Welle der COVID-19-Pandemie zurückzuführen. Die hohen Mortalitätszahlen aufgrund der zweiten Welle der COVID-19-Pandemie im Winter 2020/2021 wurden über die Grenzen der y-Achse hinaus gezeichnet, um die Darstellung der Sommermortalität nicht zu verzerrern.



**Hitzebedingte Mortalität (Sterbefälle pro 100 000 Einwohner)** in den Jahren 2018–2021 aufgeteilt nach Region und Altersgruppe. Trotz der kürzeren Dauer der Hitzeperioden (eGrafik 1) in der Region „Norden“ ist die hitzebedingte Mortalität der ältesten Altersgruppe in dieser Region vergleichbar mit den Regionen „Mitte“ und „Süden“.

# 1 Methoden

Im Folgenden erläutern wir die einzelnen Schritte zur Modellierung hitzebedingter Sterbefälle. Insbesondere betrachten wir: (1) die Nachbildung der beobachteten wöchentlichen Gesamt mortalität mittels eines generalisierten additiven Modells, (2) die Bestimmung des Temperaturschwellenwerts, (3) die Modellierung der Hintergrundmortalität unter der Annahme eines "gedeckelten" Temperaturverlaufes und (4) die Bestimmung der hitzebedingten Mortalität als Differenz der modellierten Mortalität und der Hintergrundmortalität. Dieses Vorgehen wurde bereits in [1] angewendet und ist dort ebenfalls beschrieben.

## 1.1 Nachbildung des Mortalitätsverlaufs

In einem ersten Schritt zielen wir darauf ab, den Verlauf der wöchentlichen Sterbefälle im Sommerhalbjahr (KW15 bis KW40) nachzubilden und nehmen dabei drei wesentliche Komponenten an:

1. einen langfristigen Trend, der Bevölkerungswachstum oder steigende Lebenserwartung abbildet,
2. ein saisonales Muster, das die jahreszeitliche Veränderung in der Mortalität als Funktion der Kalenderwoche abbildet,
3. Expositions-Wirkungskurven, die den Einfluss der Temperatur auf die Mortalität quantifizieren.

Wir verwenden ein generalisiertes additives Modell (GAM) [5], das es erlaubt, diese Komponenten aus den Daten zu schätzen, ohne spezifische Annahmen über ihre Form zu machen. Da die Zielvariable (wöchentliche Anzahl von Sterbefällen) ganzzahlig ist, nehmen wir eine logarithmische Link-Funktion und negativ-binomial verteilte Zufallsstörung (mit Überdispersionsparameter  $\theta$ ) an. Die Modellgleichung ergibt sich dann zu:

$$s_{t,a} \sim \text{NegBin}(E(s_{t,a}), \theta) \quad (1)$$

$$E(s_{t,a}) = b_{t,a} \exp \left( \beta_a + f_a^{\text{Trend}}(t) + f_a^{\text{Saison}}(w_t) + \sum_{i=0}^3 f_{a,d_t}^{\text{Hitze},i}(m_t) \right). \quad (2)$$

Hier ist die erwartete Anzahl Sterbefälle  $E(s_{t,a})$  in Woche  $t$  und Altersgruppe  $a$  eine Funktion der entsprechenden Bevölkerungsgröße  $b_{t,a}$ , des langfristigen Trends  $f_a^{\text{Trend}}(t)$ , des saisonalen Musters in Abhängigkeit der Kalenderwoche  $w_t$ ,  $f_a^{\text{Saison}}(w_t)$ , und der Expositions-Wirkungskurven  $f_{a,d_t}^{\text{Hitze},i}(m_t)$  in Abhängigkeit von der Wochenmitteltemperatur  $m_t$ . Die Expositions-Wirkungskurven werden separat für jede Altersgruppe  $a$  und Dekade  $d_t$  geschätzt.

Die hochgestellten Indices  $i$  der Expositions-Wirkungskurven  $f^{\text{Hitze},i}$  zeigen an, dass nicht nur die Mitteltemperatur der aktuellen Woche, sondern auch die Temperatur dreier Vorwochen berücksichtigt wird. Die Berücksichtigung der Wochenmitteltemperatur der ersten Vorwoche begründet sich damit, dass auch hohe Temperaturen am Ende einer Kalenderwoche das Mortalitätsgeschehen in der darauffolgenden Woche beeinflussen können. Die Einbeziehung der zweiten und dritten Vorwoche erlaubt dagegen "Harvesting" oder "short time mortality displacement" zu beschreiben (siehe z.B. [3], [2]). Damit ist gemeint, dass es sich bei einem Teil der während Hitzeperioden beobachteten Sterbefälle um bereits durch Vorerkrankungen sehr geschwächte Personen handelt, welche auch ohne Hitzeeinwirkung innerhalb weniger Tage oder Wochen verstorben wären. In der Gesamt mortalität können solche Verschiebungen am Ende einer ausgeprägten Hitzeperiode als "Untersterblichkeit" sichtbar werden: Die Anzahl beobachteter Sterbefälle liegt dann leicht unterhalb der erwarteten Hintergrundsterblichkeit. Die entsprechenden Expositions-Wirkungskurven zeigen einen negativen Zusammenhang mit der Mortalitätsrate.

Die glatten Funktionen  $f^{\text{Trend}}$ ,  $f^{\text{Saison}}$  und  $f^{\text{Hitze},i}$  werden als pönalisierte B-Splines ("P-Splines") gewählt. Die zugelassenen maximalen Freiheitsgrade (FG), wurden so gewählt, dass einerseits das saisonale Muster flexibel angepasst werden kann (1 FG pro Kalenderwoche) und andererseits zu starke Fluktuationen im Trend vermieden werden (1 FG pro 2 Jahre). Für die Expositions-Wirkungskurven wurden jeweils 8 FG zugelassen. Höhere Anzahlen von Freiheitsgraden führen nicht zu einer besseren Erklärung der Daten durch das Modell, und sowohl für das saisonale Muster als auch für die Expositions-Wirkungskurven liegt die Anzahl der effektiv verwendeten Freiheitsgrade deutlich unterhalb der maximal zulässigen. Die Bestimmung der Modellkoeffizienten und der Funktionen erfolgt mit der Statistiksoftware R (Version 4.0.5, package mgcv [4]).

Die Modellierung wird für jede der drei Regionen separat durchgeführt, insbesondere kann dadurch auch die Stärke der Zufallsstörung regional bestimmt werden. Dieses Vorgehen hat sich bereits in früheren Untersuchungen als überlegen gegenüber einem regional einheitlichen Modell erwiesen [1].

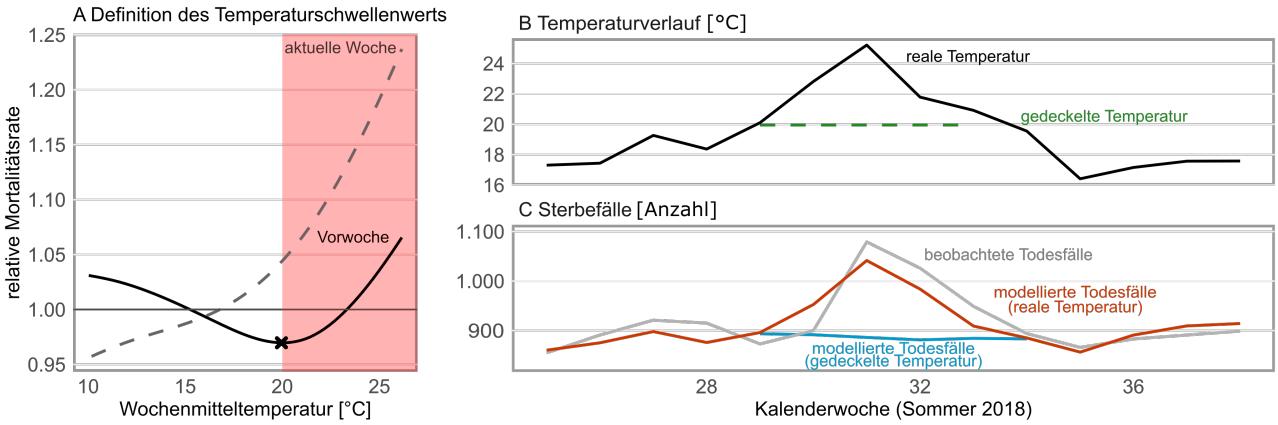


Abbildung 1: **A** Exposition-Wirkungskurven der aktuellen Woche (grau, gestrichelt) und der direkten Vorwoche (schwarz, durchgezogen). Während die Kurve der aktuellen Woche im gesamten betrachteten Temperaturbereich monoton ansteigt, weist die Kurve der Vorwoche ein klares Minimum bei 20°C auf. Der rot hinterlegte Bereich zeigt, dass für Temperaturen oberhalb des Schwellenwertes beide Exposition-Wirkungskurven monoton ansteigen. **B** Realer (schwarz) und gedeckelter (grün) Temperaturverlauf bezüglich des Schwellenwerts aus **A**. **C** Verlauf der wöchentlichen Sterbefallzahlen (grau), vom Modell nachgebildeter Verlauf bei realen Temperaturverhältnissen (rot) und Hintergrundmortalität unter Annahme des "gedeckelten Temperaturverlaufs" ( $\leq 20^\circ\text{C}$ ). Alle Unterabbildungen beziehen sich auf Daten der Altersgruppen 85+ im Jahr 2018 in Bayern.

## 1.2 Schätzung des Temperaturschwellenwerts

Zur Definition von Hitzeperioden und zur Quantifizierung der Anzahl hitzebedingter Sterbefälle auf der Basis wöchentlicher Daten definieren wir mit Hilfe der Exposition-Wirkungskurven einen Temperatur-Schwellenwert, oberhalb dessen eine Woche als "Hitzewoche" bezeichnet wird und relevant auf die Mortalität einwirkt. Dieser Schwellenwert wird definiert als die Mitteltemperatur, oberhalb derer sowohl die Exposition-Wirkungskurve der aktuellen Woche als auch der Vorwoche zu steigenden Mortalitätsraten führt. In unserem Fall entspricht der Schwellenwert dem Minimum der Exposition-Wirkungskurve der Vorwoche (siehe Abbildung 1 **A**).

## 1.3 Hintergrundmortalität

Zur Definition der Hintergrundmortalität betrachten wir einen "gedeckelten" Temperaturverlauf, der dem realen Verlauf entspricht, aber für Werte oberhalb des Schwellenwertes auf diesem verbleibt (siehe Abbildung 1 **B**). Durch Einsetzen dieses hypothetischen Temperaturverlaufes in die Modellgleichung ergibt sich dann ein hypothetischer Verlauf der Mortalität, der innerhalb unseres Modells für die gedeckelte Temperatur erwartet würde (siehe Abbildung 1 **C**).

## 1.4 Hitzebedingte Mortalität

Die hitzebedingte Mortalität kann schließlich durch Bildung der Differenz zwischen der modellierten Mortalität für den realen Temperaturverlauf und der Hintergrundmortalität errechnet werden. Die Gesamtzahl hitzebedingter Sterbefälle ergibt sich als Summe über alle Kalenderwochen des Sommerhalbjahrs (KW 15 bis KW 40).

## 2 Daten

### 2.1 Temperaturdaten

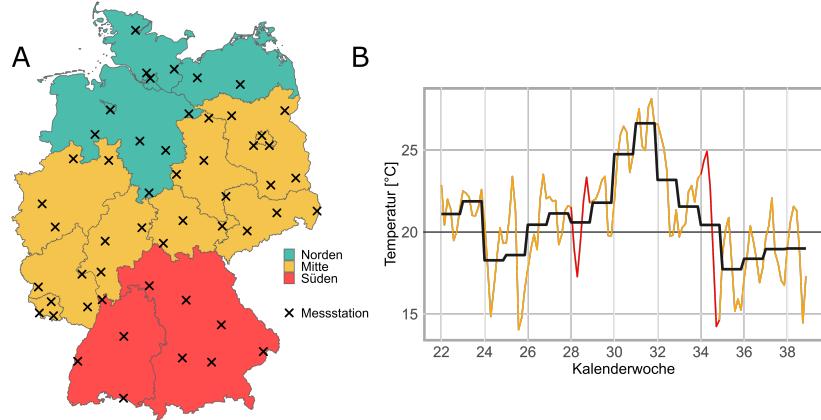


Abbildung 2: **A** Geographische Verteilung der verwendeten Temperaturmesstationen. Die Regionsunterteilung ist farblich gekennzeichnet. **B** Beispielhafter Vergleich der Tagesmitteltemperatur (gelb) und Wochenmitteltemperatur (schwarz) im Sommer 2018 in Baden-Württemberg. Wochen, die stark schwankende Tagesmitteltemperaturen aufweisen sind rot hervorgehoben.

Die verwendeten Temperaturdaten basieren auf stündlichen Messungen an 52 Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Die geographische Verteilung der Stationen ist in Abbildung 2A dargestellt. Für jede Station werden zuerst Tagesmittel (über 24 Stunden) gebildet, die dann über alle Stationen eines Bundeslandes aggregiert werden. Schließlich werden aus den Tagesmitteln pro Bundesland die Wochenmittel errechnet. Die bundeslandspezifischen Werte gehen direkt in die Modellierung ein und werden erst in der Analyse zu Regionen aggregiert. Aufgrund der großen Anzahl an Werten pro verwendetem Datenpunkt ( $24\text{h} \times 7\text{ Tage} \times \text{min. } 3\text{ Stationen pro Bundesland}$ ), können einzelne Fehlwerte gefahrlos ignoriert werden. Die Stationen wurden zuvor so gewählt, dass keine längeren Ausfallzeiten im Untersuchungszeitraum auftreten. Abbildung 2B illustriert den Unterschied zwischen Tages- und Wochenmitteltemperaturen am Beispiel Baden-Württemberg im Sommer 2018.

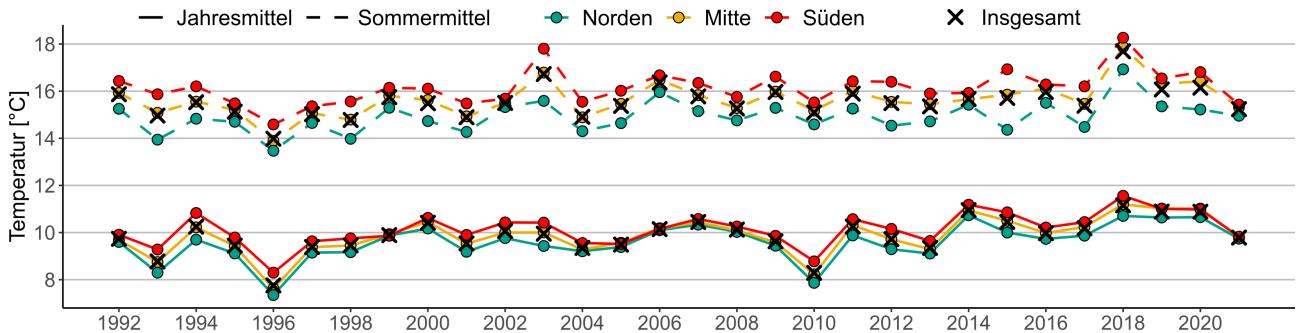


Abbildung 3: Verlauf der Jahresmitteltemperatur (durchgezogen) sowie der mittleren Sommertemperatur (gestrichelt) im Zeitraum 1992-2021. Farbkodierung entspricht der Regionsunterteilung.

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur sowie der mittleren Sommertemperatur im Zeitraum 1992-2021 in den drei untersuchten Regionen sowie im gesamten Land. Besonders bei der mittleren Sommertemperatur zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Regionen. Das bundesweite Mittel stimmt weitestgehend mit den Werten der Region Mitte überein.

Abbildung 4 **A** zeigt jeweils die maximale Wochentemperatur für Deutschland und die drei Regionen im Zeitraum 1992- 2021. Dabei wird deutlich, dass etwa im Jahr 2003 durchaus starke Temperaturunterschiede zwischen den Regionen bestanden, während sich die Temperaturen im Jahr 2018 in sehr ähnlichen Größenordnungen bewegten. **4B** zeigt die Anzahl von Hitzewochen für Deutschland insgesamt und jede der drei

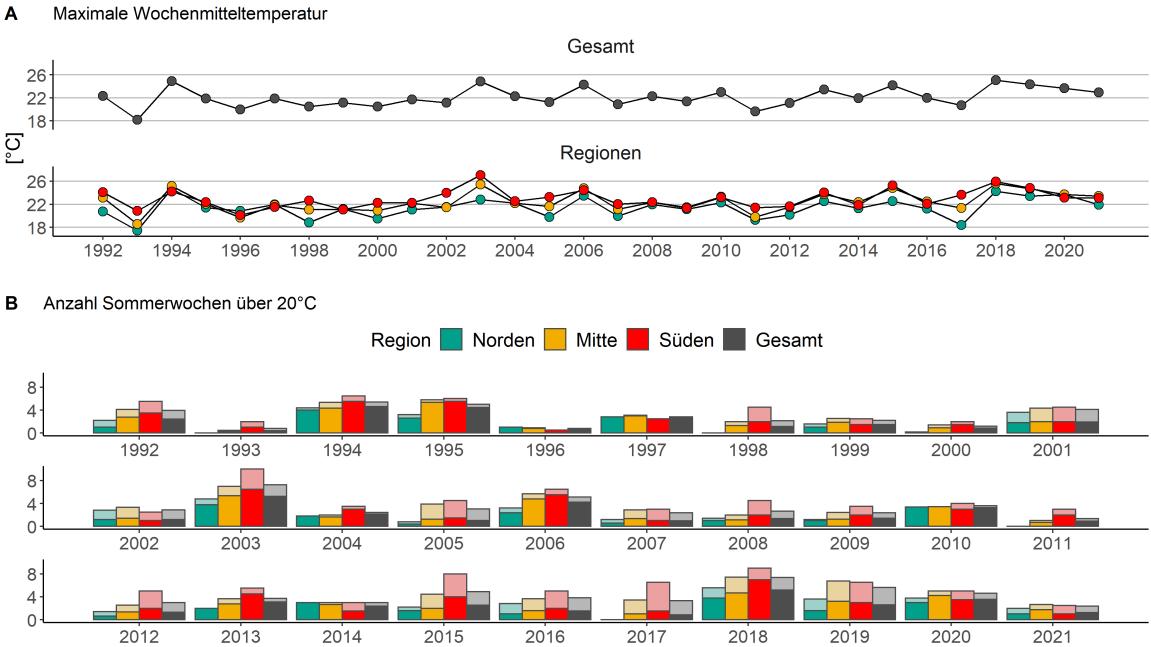


Abbildung 4: Temperaturkennzahlen der Jahre 1992-2021. **A** Maximale Wochenmitteltemperatur pro Jahr gemittelt über alle Bundesländer (oben) bzw. über die drei Regionen (unten). **B** Mittlere Anzahl heißer Wochen (Wochen mit Temperatur  $> 20^{\circ}\text{C}$ ) pro Jahr und Region (Farben wie oben) sowie das gesamte Land (grau). Die leuchtenden Bereiche markieren die Anteile der längsten zusammenhängenden Hitzeperiode an der Gesamtzahl heißer Wochen (zusammenhängende Perioden wurden pro Bundesland berechnet und dann gemittelt).

Regionen. Zusätzlich ist farblich hervorgehoben, wie viele dieser Wochen in einer zusammenhängenden Hitzeperiode auftraten. Es fällt auf, dass die drei Jahre 2018, 2019 und 2020 deutlich mehr Hitzewochen aufwiesen als andere Jahre in der Dekade 2012-2021. Außerdem fällt die besonders lange Dauer der Hitzeperiode 2018 ins Auge.

Wie auch am Beispiel in Abbildung 2 **B** deutlich wird, stellt sich die Dauer von Hitzeperioden in den Tages- und Wochendaten durchaus unterschiedlich dar. Insbesondere zeigt sich ein glättender Effekt der Wochenmittel: die besonders lang andauernde Hitzeperiode in Baden-Württemberg im Sommer 2018 (9 aufeinanderfolgende Wochen mit Mitteltemperatur über  $20^{\circ}\text{C}$ ) bildet sich zwar auch in den Tagesdaten ab, allerdings ist dort immer wieder ein über mehrere Tage andauernder deutlicher Temperaturrückgang zu beobachten. Die längste zusammenhängende Tagesperiode mit einer Tagesmitteltemperatur  $> 20^{\circ}\text{C}$  im Sommer 2018 betrug in Baden-Württemberg 18 Tage.

Region	Wochen $> 20^{\circ}\text{C}$	(Tage/7) $> 20^{\circ}\text{C}$
Norden	1.8	1.2
Mitte	2.2	1.4
Süden	2.9	1.7

Tabelle 1: Mittlere Dauer der längsten zusammenhängenden Hitzeperiode pro Region. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Wochendaten wird die Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Mitteltemperatur  $> 20^{\circ}\text{C}$  durch 7 geteilt.

Tabelle 1 fasst für die drei Regionen Norden, Mitte und Süden jeweils die mittlere Dauer der längsten zusammenhängenden Hitzeperiode im Wochenmittel zusammen und stellt sie der mittleren Dauer der längsten zusammenhängenden Periode mit Tagesmittel  $> 20^{\circ}\text{C}$  gegenüber (zur besseren Vergleichbarkeit betrachten wir (Anzahl Tage)/7).

## 2.2 Bevölkerungsdaten

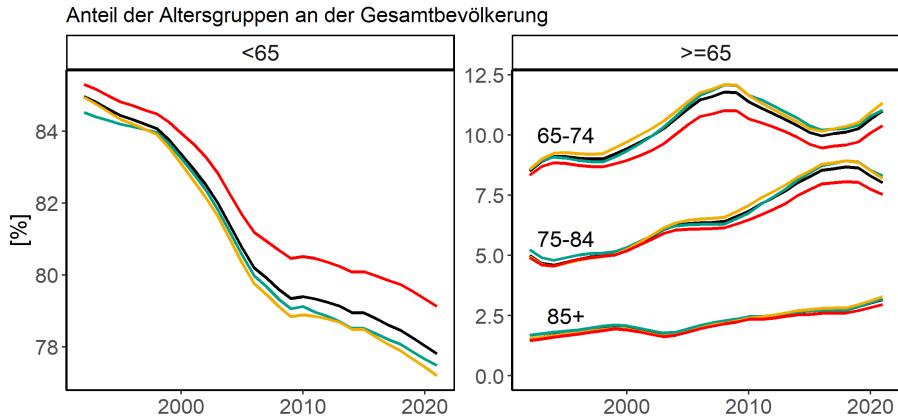


Abbildung 5: Entwicklung des Anteils der vier Altersgruppen an der Gesamtbevölkerung und der Bevölkerung der drei Regionen.

Sterbefallzahlen und Mortalität (Sterbefälle pro 100.000 Einwohner) werden auch von demographischen Veränderungen, wie zum Beispiel Bevölkerungswachstum oder Steigerung der Lebenserwartung, beeinflusst. Die Bevölkerung in Deutschland ist zwischen 1992 und 2021 von rund 81 Millionen auf rund 83,5 Millionen angewachsen. Gleichzeitig hat sich der Anteil der Älteren stark erhöht: inzwischen sind rund 3% der Bevölkerung älter als 85, 1992 machte diese Altersgruppe nur 1,5% der Bevölkerung aus.

Abbildung 5 stellt die Entwicklung der Bevölkerung sowie den Anteil der einzelnen Altersgruppen für die drei Regionen und Deutschland insgesamt im Zeitraum 1992 - 2021 dar. Diese Veränderungen sind für die Betrachtung der Hitzemortalität von Bedeutung, da besonders ältere Menschen von der Hitzeauswirkungen betroffen sind. Demnach kann eine Zunahme des Anteils älterer Einwohner zu einem Anstieg der hitzebedingten Sterbefälle führen auch wenn die Anfälligkeit der Bevölkerung insgesamt abnimmt.

### 3 Analysen

Im Folgenden zeigen wir weiterführende Analysen, die die im Haupttext dargestellten Untersuchungen vertiefen.

#### 3.1 Vergleich mit Exzess-Sterbefällen

Als Vergleichswert zur geschätzten Anzahl hitzebedingter Sterbefälle (siehe Haupttext) kann auch die Anzahl der Exzess-Sterbefälle während Hitzeperioden bestimmt werden. Diese ist bestimmt als Differenz aus der beobachteten Mortalität und der Hintergrundmortalität in Wochen mit Mitteltemperatur über  $20^{\circ}\text{C}$ . Da sowohl die hitzebedingte Mortalität als auch die Exzess-Mortalität auf Basis der gleichen Hintergrundmortalität bestimmt werden, kann der Vergleich zwischen den beiden Größen als Gütekriterium der Modellierung herangezogen werden.

Abbildung 6 zeigt die geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle sowie die geschätzten Exzess-Sterbefälle im Zeitraum 1992-2021. Besonders in Jahren mit starker Hitzemortalität (z.B. 1994, 2003, 2018) ist eine leichte Unterschätzung der beobachteten Mortalität durch das Modell zu beobachten (Anzahl hitzebedingter Sterbefälle liegt niedriger als die Anzahl der Exzess-Sterbefälle).

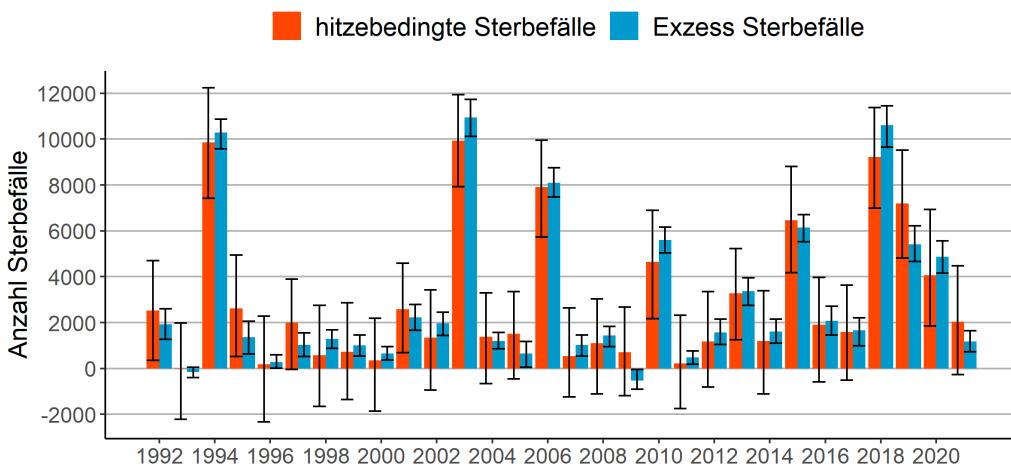


Abbildung 6: Vergleich der geschätzten Anzahl hitzebedingter Sterbefälle (rot) und Exzess-Sterbefälle (blau) für den Zeitraum 1992- 2021 in Deutschland

#### 3.2 Expositions-Wirkungskurven und Schwellenwerte

Zum besseren Verständnis des Einflusses der Wochenmitteltemperatur auf die Mortalität sind in Abbildung 7 alle Expositions-Wirkungskurven der Dekade 2012-2021, gegliedert nach Altersgruppe, Region und Vorwoche, dargestellt. Sowohl die Temperatur der aktuellen Woche als auch die Temperatur der Vorwoche zeigen ab etwa  $\leq 20^{\circ}\text{C}$  Wochenmitteltemperatur einen verstärkenden Einfluss auf die Mortalitätsrate. Vor allem für die Mitteltemperatur der aktuellen Woche zeigt sich eine klare Gliederung der Regionen und Altersgruppen, wobei die Altersgruppe 85+ und die Region Norden am stärksten betroffen sind. Die Mitteltemperaturen der zweiten und dritten Vorwochen, zeigen entweder einen vernachlässigbaren oder einen leicht negativen Einfluss auf die Mortalitätsrate.

Wie bereits im Abschnitt "Methode" beschrieben, wählen wir als Temperaturschwellenwert das Minimum der Expositions-Wirkungskurve der Vorwoche. Die resultierenden Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. In einigen Fällen kann kein Schwellenwert bestimmt werden, da die entsprechenden Expositions-Wirkungskurven kein klares Minimum aufweisen. Diese Limitation der Methode ist in Abbildung 9 verdeutlicht. Dort zeigen wir die Expositions-Wirkungskurven der aktuellen Woche und der Vorwoche für alle Regionen, Altersgruppen und Dekaden.

Sofern sie eindeutig bestimmt werden können, bewegen sich die Schwellenwerte eng um  $20^{\circ}\text{C}$ . In Abbildung 8 vergleichen wir daher die geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle auf Basis der individuellen Schwellenwerte

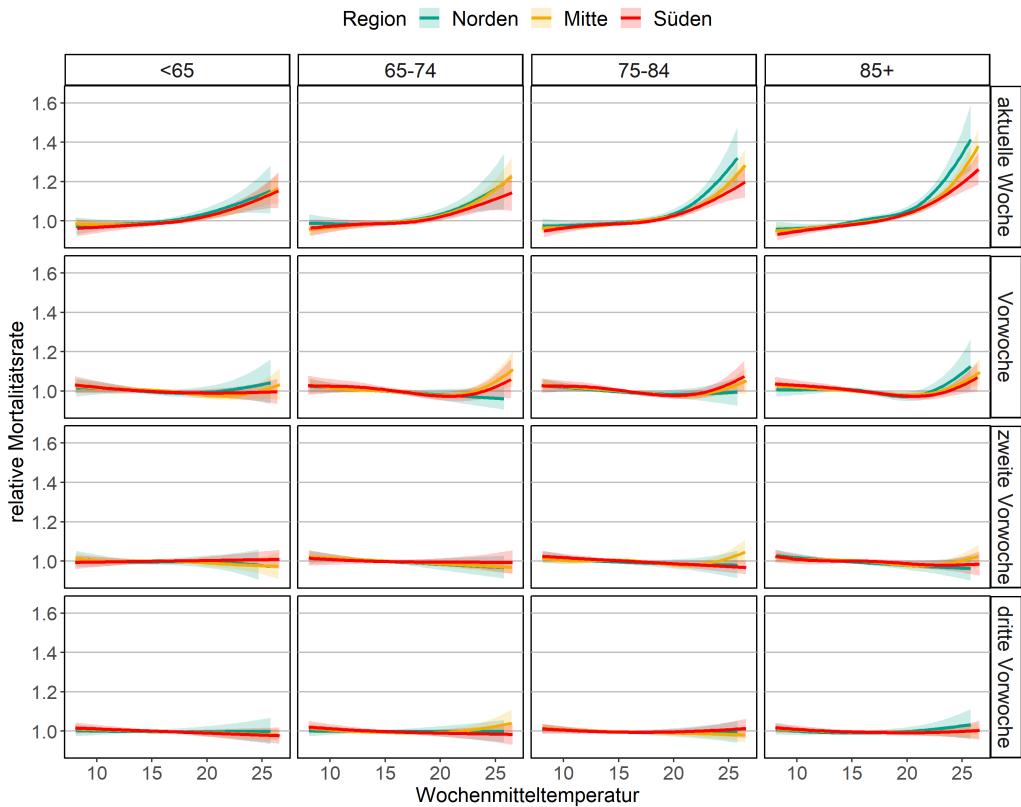


Abbildung 7: Exposition-Wirkungskurven der Dekade 2011-2021 für alle Altersgruppen (Spalten), Vorwochen (Zeilen) und Regionen. Die Mitteltemperaturen der aktuellen Woche und der Vorwoche haben den stärksten positiven Einfluss auf das relative Mortalitätsrisiko. Vor allem für die aktuelle Woche zeigt sich eine klare Gliederung der Regionen und Altersgruppen wobei die Altersgruppe 85+ und die Region Norden am stärksten betroffen sind.

mit den geschätzten Anzahlen, die sich ergeben, wenn ein einheitlicher Schwellenwert von  $20^{\circ}\text{C}$  für alle Regionen und Altersgruppen verwendet wird.

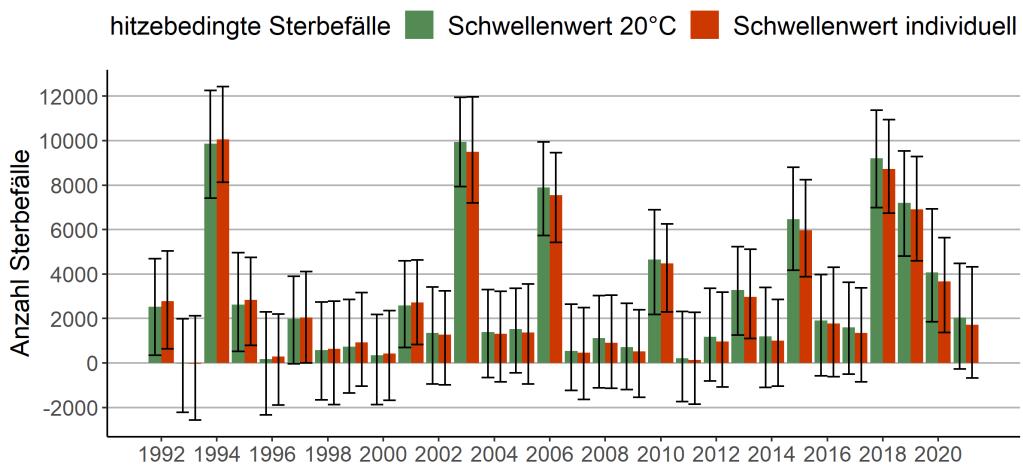


Abbildung 8: Geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle wenn ein einheitlicher Temperaturschwellenwert von  $20^{\circ}\text{C}$  angenommen wird (grün) im Vergleich mit den Sterbefällen unter Annahme von regional- und altersspezifischen Schwellenwerten (rot) für den Zeitraum 1992-2021 in Deutschland.

1992-2001				
Region	< 65	65 – 74	75 – 84	85+
Norden	-	-	19.2	18.7
Mitte	-	20.8	19.9	19.6
Süden	-	-	20.0	20.0

2002 - 2011				
Region	< 65	65 – 74	75 – 84	85+
Norden	-	-	19.7	19.5
Mitte	20.8	20.2	20.2	19.9
Süden	-	20.8	21.1	20.5

2012 - 2021				
Region	< 65	65 – 74	75 – 84	85+
Norden	17.7	-	-	19.7
Mitte	21.3	20.5	20.8	20.2
Süden	-	20.8	20.0	20.8

Tabelle 2: Berechnete Temperaturschwellenwerte für alle Regionen und Altersgruppen. Fehlende Werte sind mit einem Querstrich gekennzeichnet, hier liegt das Minimum am Rand des beobachteten Temperaturbereichs. Diese Werte werden für die Modellierung der Hintergrundmortalität durch Werte aus benachbarten Regionen/Altersgruppen ersetzt.

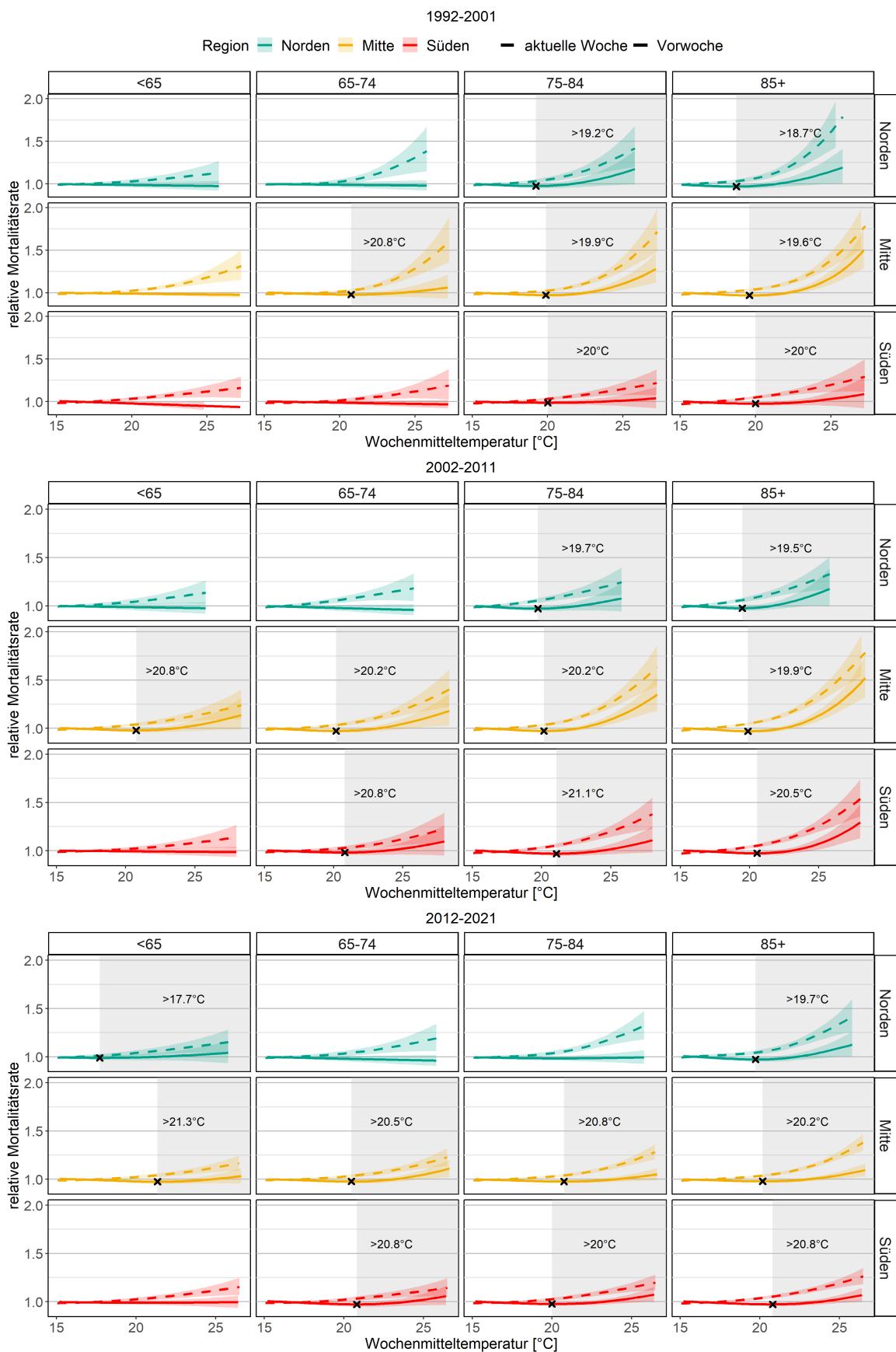


Abbildung 9: Exposition-Wirkungskurven der aktuellen Woche und der Vorwoche für alle Regionen, Altersgruppen und Dekaden. Schwarze Kreuze kennzeichnen den Schwellenwert (sofern bestimmbar). Temperaturbereiche oberhalb des Schwellenwerts sind grau hinterlegt.

### 3.3 Vergleich mit früherer Schätzung

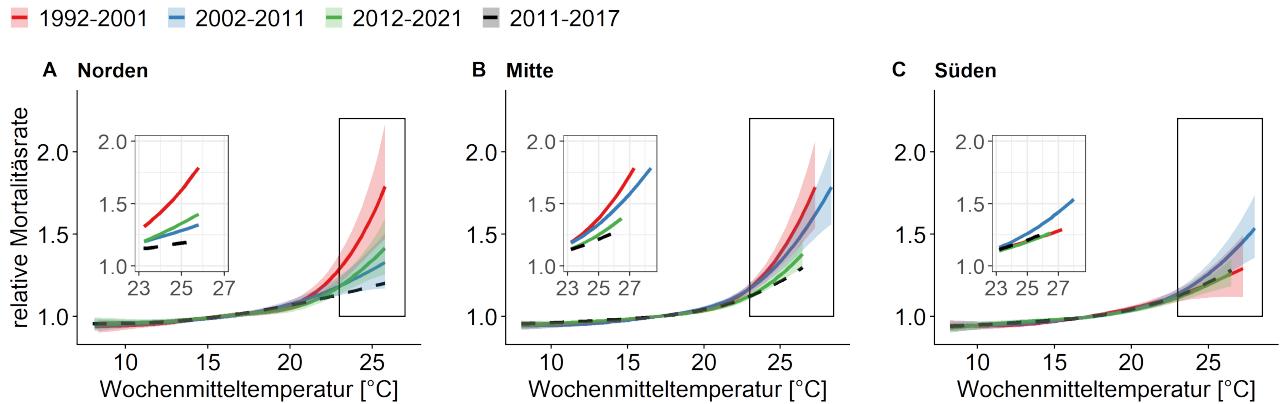


Abbildung 10: Trend der Expositions-Wirkungskurven über die Dekaden für die drei Regionen Norden, Mitte und Süden. Dargestellt sind Ergebnisse für die Altersgruppe 85+, da dort die stärksten Effekte zu beobachten sind. Die drei Dekaden 1992-2001 (rot), 2002-2011 (blau) und 2012-2021 (grün) zeigen einen leicht abfallenden Trend, der besonders deutlich in der Region Mitte zu sehen ist. Die Schätzung für den Zeitraum 2011-2017 ist in grau dargestellt und liegt leicht unterhalb der Schätzung für 2012-2021 (grün).

Für den Zeitraum 1992-2017 wurde die hitzebedingte Mortalität in Deutschland schon in einer früheren Publikation [1] untersucht. Die Einbeziehung der besonders heißen Jahre 2018-2020 führt zu einer Neuschätzung der Expositions-Wirkungskurven der Dekade 2012-2021, die im Vergleich mit dem Modell auf Basis der Daten bis 2017 einen steileren Anstieg verzeichnen. Abbildung 10 zeigt die langfristige Entwicklung der Expositions-Wirkungskurven beispielhaft für die Altersgruppe 85+ und alle drei Regionen. Zur besseren Kontextualisierung sind auch die in [1] geschätzten Expositions-Wirkungskurven für die Dekade 2011-2017 dargestellt, die im Vergleich mit der aktualisierten Schätzung etwas weniger steil ansteigen.

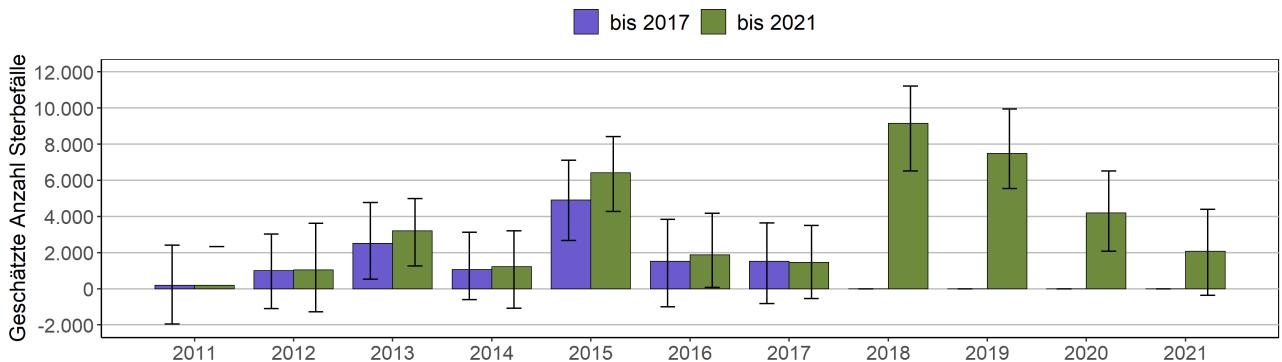


Abbildung 11: Geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle im Zeitraum 2011-2021 auf Basis der Daten bis 2017 (violett) bzw. bis 2021 (grün). Der steilere Anstieg der Expositions-Wirkungskurven durch Einbeziehung der Jahre 2018-2021 führt zu einer etwas höheren Schätzung der Sterbefälle in früheren Jahren. Die Unterschiede sind nicht statistisch signifikant.

Die Neuschätzung der Expositions-Wirkungskurven für die Dekade 2012-2021 impliziert, dass auch die geschätzte Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle für diese Dekade leicht nach oben korrigiert werden muss. Abbildung 11 zeigt die Schätzung hitzebedingter Sterbefälle aus [1] im direkten Vergleich mit den aktualisierten Werten. Die aktualisierten Schätzwerte liegen im Rahmen der 95%-Konfidenzbereiche der früheren Schätzung.

### 3.4 Vergleich der Hitzperiode 2018 mit Hitzeperioden 1994 und 2003

Im gesamten Zeitraum 1992-2021 treten besonders die Jahre 1994, 2003 und 2018 durch sehr hohe Temperaturen, langanhaltende Hitzeperioden (siehe Abschnitt "Daten") und hohe Anzahlen hitzebedingter Sterbefälle (siehe Haupttext) hervor. Da diese Jahre außerdem in drei unterschiedlichen Dekaden liegen, liegt es nahe, hier mögliche Veränderungen in der Wirkung von Temperatur auf die Mortalität direkt zu vergleichen.

Abbildung 12 zeigt die hitzebedingte Mortalität in Abhängigkeit von der beobachteten Temperatur für die drei Jahre 1994, 2003 und 2018, jeweils unterschieden nach Altersgruppen (Spalten) und Regionen (Zeilen). Bei vergleichbaren Wochenmitteltemperaturen liegt die vom Modell geschätzte hitzebedingte Mortalität im Jahr 2018 für alle Altersgruppen klar unterhalb der Werte für 1994 und 2003. Dass die absoluten Sterbefallzahlen in den drei Jahren dennoch in vergleichbaren Größenordnungen liegen, erklärt sich durch die hohe Gesamtzahl heißer Wochen sowie den gestiegenen Anteil der Bevölkerung in höheren Altersgruppen. Zusätzlich wurden 1994 und 2003 zum Teil deutlich höhere Wochenmitteltemperaturen gemessen als 2018.

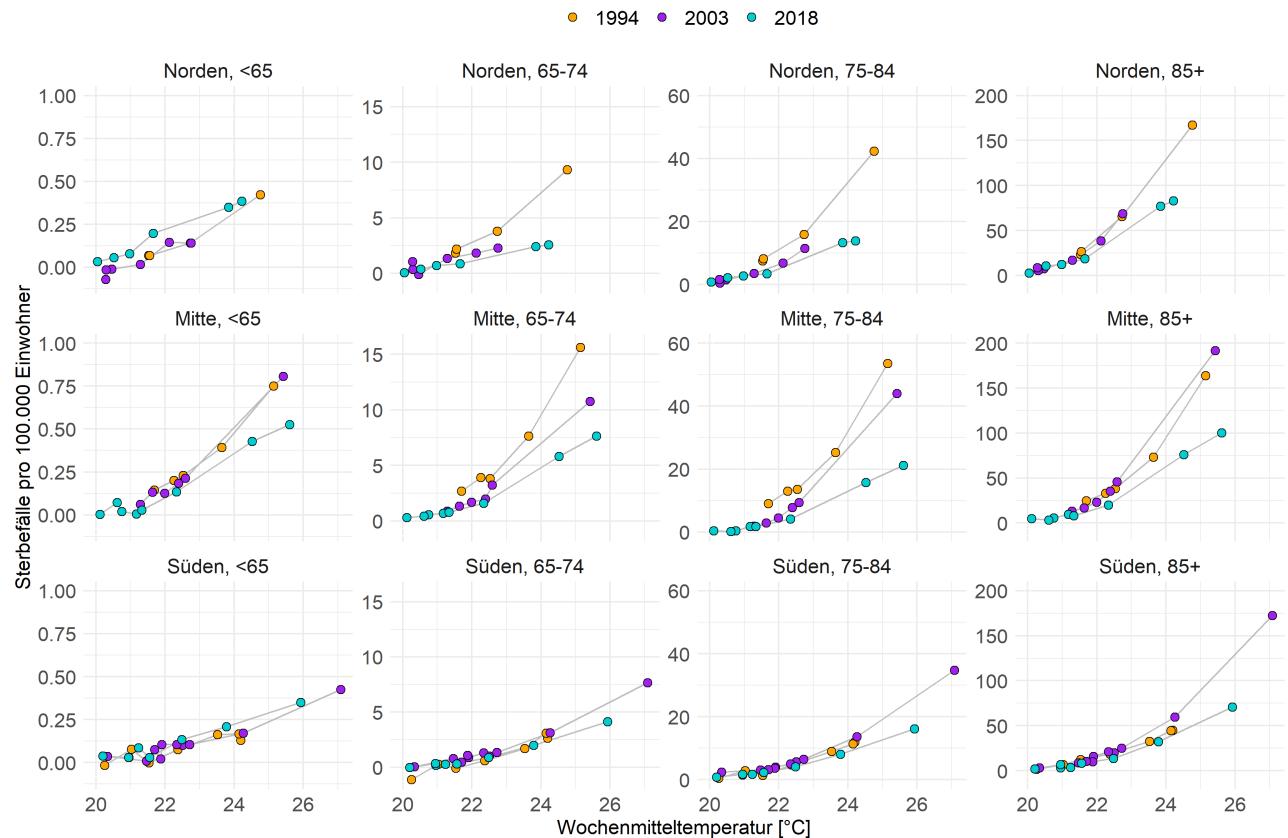


Abbildung 12: Vergleich der Assoziation zwischen Hitze und Mortalität für die Jahre 1994, 2003, 2018 in den drei Regionen Norden, Mitte und Süden. Die vier Altersgruppen sind aufsteigend von links nach rechts dargestellt. In allen Altersgruppen liegt die vom Modell geschätzte hitzebedingte Mortalität im Jahr 2018 niedriger als 1994 oder 2003.

## References

- [1] Matthias an der Heiden, Stefan Muthers, Hildegard Niemann, Udo Buchholz, Linus Grabenhenrich, and Andreas Matzarakis. Heat-related mortality: An analysis of the impact of heatwaves in germany between 1992 and 2017. *Deutsches Ärzteblatt International*, 117(37):603–309, 2020.
- [2] Ben Armstrong, Antonio Gasparini, and Shakoor Hajat. Estimating mortality displacement during and after heat waves. *American journal of epidemiology*, 179(12):1405–1406, 2014.
- [3] Shakoor Hajat, Ben G Armstrong, Nelson Gouveia, and Paul Wilkinson. Mortality displacement of heat-related deaths: a comparison of delhi, sao paulo, and london. *Epidemiology*, 16(5):613–620, 2005.
- [4] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
- [5] Simon N Wood. *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC, New York, 2006.