Originalarbeit

Hitzeassoziierte Mortalität im Extremsommer 2022

Eine Analyse auf Basis täglicher Daten

Veronika Huber, Susanne Breitner-Busch, Cheng He, Franziska Matthies-Wiesler, Annette Peters, Alexandra Schneider

Lehrstuhl für Epidemiologie, Institut für Medizinische Informationsverarbeitung, Biometrie und Epidemiologie (IBE), Medizinische Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität (LMU), München: Dr. rer. nat. Veronika Huber, Dr. rer. nat. Susanne Breitner-Busch, Prof. Dr. rer. biol. hum. Annette Peters

Institut für Epidemiologie, Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Neuherberg: Dr. rer. nat. Veronika Huber, Dr. rer. nat. Susanne Breitner-Busch, Cheng He Ph.D., Dr. phil. Franziska Matthies-Wiesler; Prof. Dr. rer. biol. hum. Annette Peters, Dr. rer. biol. hum. Alexandra Schneider

Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit (KLUG e.V.), Berlin: Dr. phil. Franziska Matthies-Wiesler

Munich Heart Alliance, German Center for Cardiovascular Health (DZHK e.V., partner-site Munich), München: Prof. Dr. rer. biol. hum. Annette Peters

Zusammenfassung

Hintergrund: Die Abschätzung hitzeassoziierter Übersterblichkeit ist zentraler Bestandteil einer Dokumentation der Gesundheitsfolgen des Klimawandels. Bisherige Schätzungen der hitzeassoziierten Sterbefälle des Robert Koch-Instituts (RKI) für Deutschland beruhen auf Sterbefallzahlen mit wöchentlicher Auflösung.

Methode: Wir nutzen erstmals höher aufgelöste tägliche Daten der Gesamtmortalität verknüpft mit Tagesmitteltemperaturen aus allen Bundesländern, um die hitzeassoziierte Mortalität im Zeitraum 2000–2023 auf Basis von Quasi-Poisson-Modellen und multivariaten Meta-Regressionsanalysen abzuschätzen. Dabei liegt der Fokus auf dem Extremsommer 2022.

Ergebnisse: Unsere Berechnungen ergaben 9 100 (95-%-Konfidenzintervall: [7 300; 10 700]) hitzeassoziierte Sterbefälle in Deutschland im Sommer 2022, während die bisherigen Analysen des RKI von 4 500 [2 100; 7 000] hitzeassoziierten Sterbefällen ausgehen. Unter der Annahme eines höheren Temperaturschwellenwertes zur Definition des Hitzerisikos berechneten wir für 2022 bundesweit 6 900 [5 500; 8 100] hitzeassoziierte Sterbefälle. Auch in anderen Sommern, die wie 2022 durch große Schwankungen in den Tagesmitteltemperaturen geprägt waren, schätzten wir robust mehr hitzeassoziierte Sterbefälle als das RKI. Der Ausschluss der gemeldeten COVID-19-Todesfälle hatte nur einen geringen Einfluss auf unsere Schätzungen.

Schlussfolgerung: Unsere Ergebnisse legen nahe, dass bisherige Studien auf wöchentlicher Datenbasis das volle Ausmaß der hitzeassoziierten Übersterblichkeit in Deutschland insbesondere im Extremsommer 2022 nicht erfasst haben. Eine systematische, möglichst umfassende Überwachung der hitzeassoziierten Mortalität ist Voraussetzung für die Entwicklung wirksamer Hitzeschutzmaßnahmen.

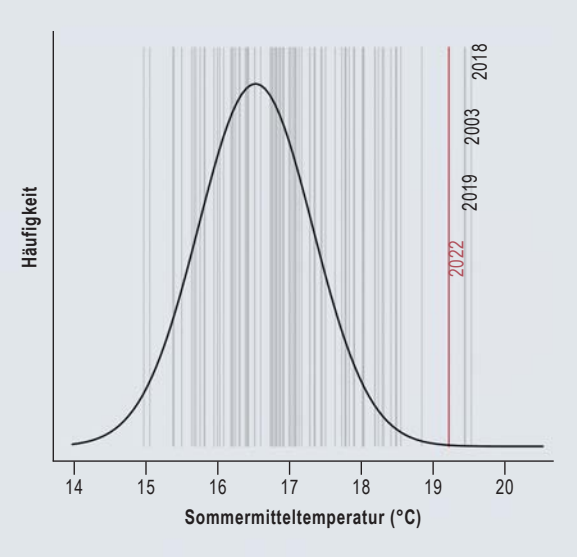
Zitierweise
Huber V, Breitner-Busch S, He C, Matthies-Wiesler F, Peters A, Schneider A: Heat-related mortality in the extreme summer of 2022—an analysis based on daily data. Dtsch Arztebl Int 2024; 121: 79–85. DOI: 10.3238/arztebl.m2023.0254

Zunehmende Hitzeepisoden stellen eines der wichtigsten Gesundheitsrisiken des Klimawandels weltweit und in Deutschland dar (1, 2). Der Zusammenhang zwischen hohen Außentemperaturen und Übersterblichkeit ist für deutsche Städte (3, 4), Regionen (5) und für Gesamtdeutschland (6, 7) gut belegt. Das hitzeassoziierte Mortalitätsrisiko ist für ältere Menschen besonders hoch (7, 8). In den meisten Fällen führt die Hitze zu einer akuten Verschlechterung von vorbestehenden kardiovaskulären und respiratorischen Erkrankungen (3). Schätzungsweise knapp ein Drittel der hitzeassoziierten Sterbefälle in deutschen Großstädten lässt sich auf den bereits eingetretenen anthropogenen Klimawandel zurückführen (9).

Aufgrund dezentraler Strukturen in der Datenerfassung und aus Datenschutzgründen sind Sterbefalldaten üblicherweise leichter auf Wochenbasis verfügbar, insbesondere wenn die Daten zeitnah genutzt und auch Alter und Geschlecht der Verstorbenen berücksichtigt werden sollen. Das ist einer der wesentlichen Gründe, warum bisherige statistische Abschätzungen der hitzeassoziierten Mortalität in Deutschland (7) und auch auf europäischer Ebene (10) auf wöchentlichen Daten beruhen.

Die Dokumentation der hitzeassoziierten Sterbefälle während extremer Hitzeperioden in der jüngeren Vergangenheit kann als Grundlage dienen, um die derzeitige Vulnerabilität Deutschlands bezüglich des Klimawandels abzuschätzen. Nach Auswertung des Deutschen Wetterdienstes gehörte der Sommer 2022 zu den vier wärmsten Sommern seit Beginn der Aufzeichnungen (11). In Analysen des Robert Koch-Instituts auf Wochenbasis wurden für den Sommer 2022 bundesweit 4 500 [2 100; 7 000] hitzeassoziierte Sterbefälle geschätzt (12, 13). Eine aktuelle Studie, die wöchentlich aufgelöste Sterbefalldaten aus ganz Europa auswertet, beziffert die hitzeassoziierte Mortalität im Sommer 2022 in Deutschland mit gerundet 8 200 [5 400; 11 000] Sterbefällen (14).

Grafik 1



Mittlere Temperatur in Deutschland während der Sommermonate Juni, Juli, August (grau) im Zeitraum 1940–2023 im Vergleich zur geschätzten Häufigkeitsverteilung (schwarz) in der klimatologischen Referenzperiode (1961–1990). Die vier wärmsten Jahre sind beschriftet. Das Jahr 2022 ist rot hervorgehoben. Siehe *eGrafik 2* für die Daten der einzelnen Bundesländer.

Die große Diskrepanz zwischen den vorliegenden Schätzungen zum Sommer 2022 auf Wochenbasis (12–14) erklärt sich durch unterschiedliche Methoden der Übersterblichkeitsberechnung und durch Unsicherheiten in der Bestimmung eines Temperaturschwellenwertes. Das thermische Optimum, das üblicherweise als Schwellenwert zur Definition hitzeassoziierter Mortalität genutzt wird, lässt sich als Minimum der Temperatur-Mortalitäts-Kurve häufig nur ungenau bestimmen (15). Zudem werden neben dem thermischen Optimum in der Literatur auch andere Kriterien zur Bestimmung eines Hitzeschwellenwertes genutzt (16, 17).

Gleichzeitig ist gut belegt, dass sich hohe Temperaturen akut innerhalb weniger Tage auf das Mortalitätsrisiko auswirken (18). Deswegen ist unsere Hypothese, dass nur wenige Tage andauernde Hitzespitzen, wie sie 2022 häufig auftraten, in Analysen basierend auf Daten mit wöchentlicher Auflösung in ihrer Wirkung auf die hitzeassoziierte Mortalität unterschätzt werden, unabhängig vom genutzten Temperaturschwellenwert und des genauen statistischen Modellansatzes zur Berechnung der Übersterblichkeit.

Um dieser Hypothese nachzugehen, schätzen wir in der vorliegenden Arbeit die Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle (und Sterberaten pro 100 000 Einwohner) im Extremsommer 2022 und allen Jahren seit 2000 in den Bundesländern und bundesweit auf Basis von täglichen Temperaturdaten und Sterbefallzahlen. Wir nutzen etablierte epidemiologische Modellansätze (18) und berücksichtigen eine mögliche Anpassung an vermehrte Hitzeperioden während der letzten zwei Jahrzehnte. In Sensitivitätsanalysen betrachten wir auch die gemeldeten COVID-19-Todesfälle und bilden die Unsicherheit in der Bestimmung eines Temperaturschwellenwertes zur Definition der hitzeassoziierten Mortalität ab.

Methode

Daten

Daten der täglichen Gesamtsterbefälle in den Jahren 2000 bis 2023 (bis einschließlich 17. September 2023) in den 16 deutschen Bundesländern stammen aus zwei Sonderveröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes (19, 20). Hier erfasst sind alle von deutschen Standesämtern registrierten Sterbefälle, die den Bundesländern über die amtlich gemeldeten Wohngemeinden der Verstorbenen zugeordnet werden. Gemeldete COVID-19-Todesfälle auf Tagesbasis in den Bundesländern wurden vom Robert Koch-Institut zur Verfügung gestellt (bis einschließlich 16. Juli 2023). Die jährlichen Daten der Gesamtbevölkerung in den Bundesländern im Zeitraum 2000–2022 entstammen der Genesis-Datenbank des Statistischen Bundesamtes (21). In dieser Statistik werden alle in Deutschland meldepflichtigen Personen berücksichtigt. Da die Daten des Bevölkerungsstandes für 2023 zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht zur Verfügung standen, wurde für dieses Jahr der Bevölkerungsstand von 2022 angenommen. Tagesmittelwerte der Temperatur in den Bundesländern und in Gesamtdeutschland im Zeitraum 1940 bis 2023 (bis einschließlich 30. September 2023) wurden als Flächenmittel aus den stündlichen 2-m Temperaturwerten der frei verfügbaren ERA5-Reanalysedaten (22) ermittelt. Wir definieren, dass ein Extremsommer dann auftrat, wenn die mittlere Sommertemperatur (Juni-August) mehr als drei Standardabweichungen über dem Mittel der klimatologischen Referenzperiode 1961–1990 lag.

Statistische Analyse

Die Abschätzung der Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge erfolgte in zwei Schritten, entsprechend Gasparrini et al. (18) *(eSupplement, eGrafiken 1 a + b)*. Zunächst wurden auf Basis der täglichen Mortalitäts- und Temperatur-Zeitreihen in den einzelnen Bundesländern Quasi-Poisson-Regressionsmodelle gerechnet. Darin modellierten wir die Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge mit einer nicht-linearen Funktion, welche Verzögerungseffekte von bis zu 21 Tagen berücksichtigt. Im zweiten Schritt wurden die Bundesland-spezifischen Modellkoeffizienten in Meta-Regressionsmodellen zusammengefasst.

Die Anzahl der täglichen hitzeassoziierten Sterbefälle in den Bundesländern ermittelten wir dann basierend auf den Modellkoeffizienten aus dem zweiten Analyseschritt, den Tagesmitteltemperaturen und den registrierten Sterbefällen, entsprechend Gasparrini und Leone (23) (Formel im eSupplement). Dabei berücksichtigten wir nur Tage, an denen die beobachtete Tagesmitteltemperatur oberhalb der Exzess-Risiko-Temperatur (ERT) lag. Wir bestimmten die ERT als Tagesmitteltemperatur, ab der durchgehend ein signifikant erhöhtes relatives Mortalitätsrisiko auftrat (untere Grenze des 95-%-Konfidenzintervalls > 1) (24).

Um mögliche Anpassungsprozesse abzubilden, berechneten wir die Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge in zwei Teilperioden (2000–2010 und 2011–2022). Die Schätzungen für das Jahr 2023 beruhten auf den Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhängen für die jüngere Zeitperiode (2011–2022) und den vorläufig registrierten Sterbefallzahlen. Wir beschränkten die Berechnung der hitzeassoziierten Sterbefälle auf den Zeitraum Mai bis September, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit mit den vorliegenden Studien auf Wochenbasis herzustellen (12–14).

Tabelle 1

Geschätzte Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle in Deutschland, basierend auf den Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhängen in den Zeiträumen 2000–2010 und 2011–2022 für das Standardmodell und die durchgeführten Sensitivitätsanalysen, inklusive 95-%-Konfidenzintervalle [95-%-KI]

Jahr	Standardmodell T > ERT; inklusive COVID-19-Todefälle	Zusätzlicher Temperaturschwellenwert		ohne COVID-19-Todesfälle*2
		„moderate“ Hitze: ERT < T ≤ T95	„intensive“ Hitze T > T95	
2000	2 200 [2 000; 2 400]	700 [500; 900]	1 500 [1 400; 1 700]	–
2001	4 000 [3 600; 4 400]	1 200 [900; 1 500]	2 800 [2 500; 3 100]	–
2002	3 400 [3 100; 3 800]	900 [700; 1 200]	2 500 [2 200; 2 800]	–
2003	11 600 [10 500; 12 700]	1 400 [1 000; 1 900]	10 200 [8 900; 11 400]	–
2004	2 600 [2 300; 2 900]	1 100 [800; 1 400]	1 500 [1 400; 1 600]	–
2005	3 600 [3 200; 4 000]	1 500 [1 100; 1 900]	2 100 [1 900; 2 400]	–
2006	9 000 [8 200; 9 800]	1 900 [1 500; 2 400]	7 100 [6 300; 7 700]	–
2007	2 800 [2 500; 3 100]	1 000 [700; 1 300]	1 800 [1 600; 2 000]	–
2008	3 000 [2 600; 3 300]	1 200 [900; 1 500]	1 800 [1 600; 1 900]	–
2009	2 200 [1 800; 2 600]	1 300 [1 000; 1 700]	900 [800; 1 000]	–
2010	7 600 [6 900; 8 200]	1 200 [900; 1 600]	6 300 [5 500; 7 000]	–
2011	1 500 [1 200; 1 800]	600 [500; 800]	800 [700; 1 000]	1 500 [1 100; 1 800]
2012	2 900 [2 400; 3 500]	1 000 [800; 1 200]	2 000 [1 500; 2 300]	2 900 [2 300; 3 500]
2013	5 100 [4 000; 6 000]	1 200 [1 000; 1 500]	3 800 [3 000; 4 600]	4 900 [3 900; 5 900]
2014	3 000 [2 300; 3 600]	1 200 [900; 1 500]	1 800 [1 400; 2 200]	2 900 [2 300; 3 600]
2015	9 100 [7 200; 10 900]	1 600 [1 200; 2 000]	7 500 [5 900; 9 000]	8 800 [6 900; 10 500]
2016	3 900 [3 100; 4 600]	1 200 [900; 1 600]	2 600 [2 200; 3 000]	3 800 [3 100; 4 600]
2017	2 700 [2 200; 3 300]	1 600 [1 300; 2 000]	1 100 [900; 1 300]	2 700 [2 100; 3 400]
2018	10 700 [8 600; 12 600]	2 500 [1 900; 3 100]	8 200 [6 500; 9 800]	10 500 [8 300; 12 400]
2019	9 400 [7 500; 11 000]	1 700 [1 300; 2 200]	7 600 [6 200; 8 900]	9 100 [7 200; 10 700]
2020	6 100 [5 000; 7 200]	1 300 [1 000; 1 600]	4 900 [3 900; 5 800]	6 000 [4 800; 7 200]
2021	2 800 [2 200; 3 400]	800 [600; 1 000]	2 000 [1 500; 2 400]	2 700 [2 100; 3 300]
2022	9 100 [7 300; 10 700]	2 200 [1 700; 2 700]	6 900 [5 500; 8 100]	8 600 [6 800; 10 200]
2023*1	4 500 [3 500; 5 500]	1 900 [1 400; 2 300]	2 700 [2 000; 3 200]	–

*1 vorläufige Schätzung basierend auf den Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhängen für 2011–2022 und den registrierten Sterbefalldaten bis einschließlich 17. September 2023; Schätzungen unter Ausschluss der gemeldeten COVID-19-Todesfälle sind wegen unvollständiger Datenlage zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht durchführbar.

*2 Weil die Ausklammerung der gemeldeten COVID-19-Todesfälle die Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge in der gesamten zweiten Analyseperiode (2011–2022) beeinflussen könnte, sind Ergebnisse für diese Sensitivitätsanalyse nicht erst ab dem Pandemiejahr 2020, sondern bereits ab 2011 aufgeführt.

ERT, Exzess-Risiko-Temperatur; T95, 95-%-Perzentil der Temperaturen

Als Sensitivitätsanalysen führten wir die Berechnungen erstens auf Basis der täglichen Gesamtmortalität abzüglich der gemeldeten COVID-19-Todesfälle durch. Zweitens ermittelten wir das 95-%-Perzentil der Tagesmitteltemperaturen von Mai-September (T95) und definierten „moderate“ Hitze als ERT < Tagesmitteltemperatur ≤ T95 und „intensive“ Hitze als Tagesmitteltemperatur > T95, um Unsicherheiten in der Definition eines Hitzeschwellenwertes abzubilden.

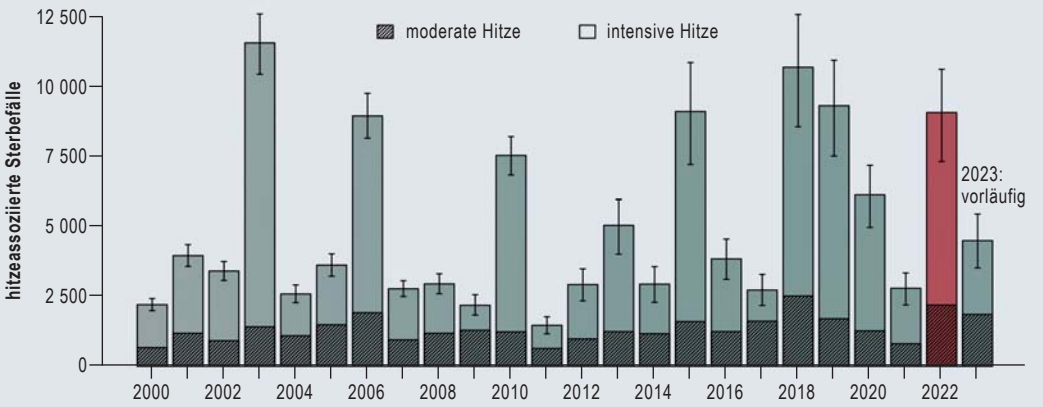
Die Datenanalyse wurde mit R (Version 4.3.1) unter Einbindung der Pakete dlnm und mixmeta durchgeführt. Der Programmiercode ist auf Anfrage bei der Erstautorin verfügbar.

Ergebnisse

Entsprechend der vorliegenden Temperaturdaten war der Sommer 2022 deutschlandweit der viertwärmste seit 1940, nur übertroffen von den Sommern 2003, 2018 und 2019 *(Grafik 1)*. Die Sommermitteltemperatur in Deutschland lag knapp 3° C (beziehungsweise > 3 Standardabweichungen) über dem Wert der klimatologischen Referenzperiode 1961–1990. In den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen waren die Sommermitteltemperaturen nur in den Jahren 2003 beziehungsweise 2018 höher als 2022 *(eGrafik 2)*. Im Sommer 2022 war in Deutschland eine deutliche Übersterblichkeit zu verzeichnen *(eGrafik 3)*.

Geschätzte Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle pro Jahr in Deutschland, basierend auf den Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhängen in den Zeiträumen 2000–2010 und 2011–2022 *(eGrafik 4)*. Die Unsicherheitsbalken zeigen die 95-%-Konfidenzintervalle. Das Jahr 2022 ist rot hervorgehoben. Die schraffierte Fläche zeigt die Aufteilung in „moderate" und „intensive" Hitze entsprechend den beiden Temperaturschwellenwerten (ERT und T95). Die Zahlen für 2023 stellen eine vorläufige Schätzung dar. ERT, Exzess-Risiko-Temperatur; T95, 95-%-Perzentil der Temperaturen

Grafik 2



Die geschätzten Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge in den Bundesländern zeigten einen signifikanten Anstieg des relativen Mortalitätsrisikos ab einer Tagesmitteltemperatur zwischen 19° C und 22° C *(eGrafik 4)*. Im Mittel entsprechen diese Werte Tageshöchsttemperaturen von ungefähr 24° C bis 27° C *(eGrafik 5)*. Nur in acht Bundesländern (Berlin, Bremen, Hamburg, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland) wurde in den jüngeren Jahren eine gewisse Verringerung des hitzeassoziierten Mortalitätsrisikos bei gleicher Temperatur beobachtet *(eGrafik 4)*.

Auf Basis dieser Zusammenhänge errechnen sich 9 100 [7 300; 10 700] hitzeassoziierte Sterbefälle für das Jahr 2022 in Deutschland *(Tabelle 1, Grafik 2)*. Das sind in etwa so viele hitzeassoziierte Sterbefälle, wie nach unserer Schätzung in den Sommern 2006, 2015 und 2019 verzeichnet wurden. Nur im historischen Rekordsommer 2003 und im Extremsommer 2018 lagen die Schätzungen der hitzeassoziierten Sterbefälle mit 11 600 [10 500; 12 700] beziehungsweise 10 700 [8 600; 12 600] deutlich über dem Wert für 2022. Im Vergleich betrug der Median über alle Jahre nur 3 800 [3 300; 4 200] hitzeassoziierte Sterbefälle und für 2023 schätzten wir (vorläufig) 4 500 [3 500; 5 500] hitzeassoziierte Sterbefälle *(Tabelle 1, Grafik 2)*. In allen Bundesländern errechneten wir für den Sommer 2022 eine deutlich erhöhte Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle vergleichbar mit den Schätzungen für vorherige Extremjahre *(Tabelle 2, eGrafik 6)*. Die relative Einordnung des Jahres 2022 auf Basis der hitzeassoziierten Sterberaten pro 100 000 Einwohner, die die Bevölkerungsentwicklung einbeziehen, weichen nur unwesentlich von den Ergebnissen auf Basis der absoluten Sterbefallzahlen ab *(eGrafik 7, eGrafik 8)*.

Für den Extremsommer 2022 lag der Höchstwert der geschätzten hitzeassoziierten Sterbefälle pro Tag bei 1 030 [800; 1 220] auf Bundesebene, zurückzuführen auf die extrem hohen Temperaturen, die in weiten Teilen Deutschlands am 20. Juli 2022 verzeichnet wurden *(Grafik 3)*. Die gemeldeten COVID-19-Todesfälle betrugen im Sommer 2022 < 173 Fälle pro Tag und damit weit weniger als die auf einzelne Hitzetage zurückführbaren Sterbefälle *(Grafik 3)*. Ähnliches zeigte sich in den einzelnen Bundesländern *(eGrafiken 9 a+b)*.

In der Sensitivitätsanalyse fanden wir, dass eine Auswertung, welcher die Gesamtmortalität abzüglich der gemeldeten COVID-19-Todesfälle zugrunde lag, keine wesentlich anderen Ergebnisse lieferte *(Tabelle 1)*. Für das Jahr 2022 betrug unsere Schätzung der hitzeassoziierten Sterbefälle dann 8 600 [6 800; 10 200] anstatt 9 100 [7 300; 10 700] entsprechend unseres Standardansatzes. Wir schätzten die Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle, die im Sommer 2022 auf „intensive" Hitze zurückzuführen war, definiert durch Tagesmitteltemperaturen, die dem 95-%-Perzentil der Verteilung im Sommer entsprechen *(eGrafik 4)*, deutschlandweit auf 6 900 [5 500; 8 100] *(Tabelle 1, Grafik 2)*.

Diskussion

In unserer Analyse nutzten wir erstmals einen Datensatz von täglichen Gesamtsterbefällen und Tagesmitteltemperaturen in allen Bundesländern, um die hitzeassoziierte Mortalität in Deutschland seit dem Jahr 2000 abzuschätzen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass in Sommern mit extremen Hitzeepisoden der letzten Dekade (2015, 2018, 2019 und zuletzt 2022) eine erhebliche Übersterblichkeit in der Größenordnung von neun- bis zehntausend hitzeassoziierten Sterbefällen in Deutschland aufgetreten ist. Für den Sommer 2022 betrug unsere Schätzung 9 100 [7 300; 10 700] hitzeassoziierte Sterbefälle bundesweit. Mehr als ein Zehntel davon lassen sich auf die extrem hohen Temperaturen zurückführen, die an einem einzigen Tag (20. Juli 2022) in Deutschland verzeichnet wurden.

Unsere Abschätzung der Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge in zwei Zeitperioden deutete auf eine ge-

wisse Anpassung an höhere Temperaturen in einigen Bundesländern hin. Die ermittelten Unterschiede im Mortalitätsrisiko bei gleicher Temperatur waren jedoch klein und zeigten überlappende 95-%-Konfidenzintervalle *(eGrafik 4)*. Diese Resultate entsprechen den Ergebnissen vorheriger Studien, in denen nicht in allen Regionen Deutschlands klare Hinweise auf eine erfolgte Anpassung an häufigere und intensivere Hitzeepisoden gefunden wurden (7). In einer kürzlich erschienenen Studie von Rai et al. (25) wurde bei der Analyse von Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhängen in 15 deutschen Großstädten im Zeitraum 1994–2016 sogar eine Zunahme des relativen hitzeassoziierten Mortalitätsrisikos bei respiratorischen Todesursachen in den Altersgruppen < 75 Jahre gefunden. Zukünftige Forschung muss aufzeigen, wo und unter welchen Bedingungen sich die deutsche Bevölkerung an die Erwärmung der letzten Jahrzehnte angepasst hat. Dabei sollten, wenn möglich, Anpassungsfaktoren wie die Einführung und Verbesserung von Hitzewarnsystemen (26) und Hitzeaktionsplänen (27) sowie die Verbreitung von Klimaanlagen (28) in der Analyse zeitlicher Veränderungen des hitzeassoziierten Mortalitätsrisikos berücksichtigt werden.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die demografische Entwicklung, die wegen fehlender Sterbefalldaten zu Altersgruppen auf Tagesbasis hier nicht betrachtet werden konnte. Dabei lassen Trends einer alternden Bevölkerung Anpassungsprozesse möglicherweise schwächer erscheinen, als sie eigentlich ausgefallen sind. Im Durchschnitt aller Bundesländer ist der Anteil der Altersgruppen 65–74, 75–84, und 85+ Jahre an der Gesamtbevölkerung über den Untersuchungszeitraum um 2,1 %, 2,8 %, beziehungsweise 1,4 % angestiegen *(eGrafik 10)*. Man würde also generell einen Anstieg des hitzeassoziierten Mortalitätsrisikos der Gesamtbevölkerung erwarten, wenn Anpassungsprozesse diesen nicht überdeckt hätten.

In unserem Standardansatz beruht die Schätzung der hitzeassoziierten Sterbefälle auf den Daten der Gesamtmortalität, ungeachtet der gemeldeten COVID-19-Todesfälle. Bisherige Studien deuten auf einen schwachen Temperatureffekt bei der Verbreitung von SARS-CoV-2 und der COVID-19-Inzidenz hin, mit partieller Evidenz einer geringeren Verbreitung und niedrigeren Inzidenz bei hohen Außentemperaturen (29, 30). Gleichzeitig gibt es Hinweise auf eine immunsuppressive Wirkung von Hitzeexposition (31), und die allgemein erhöhte Vulnerabilität der Bevölkerung während Hitzeepisoden könnte bei einer bestehenden Infektionswelle letztendlich auch die COVID-19-assoziierte Mortalität erhöhen. Aufgrund dieser Unsicherheiten halten wir die Betrachtung der Gesamtmortalität für einen robusten Analyseansatz, der COVID-19 nicht anders behandelt als jede andere hier nicht weiter identifizierte Todesursache, die den Gesamtsterbefallzahlen zugrunde liegt. Zusätzliche Analysen zeigten zudem, dass unsere Schätzung der hitzeassoziierten Sterbefallzahlen seit 2020 relativ robust gegenüber der expliziten Ausklammerung der gemeldeten COVID-19-Todesfälle ist *(Tabelle 1)*. Dies entspricht der Beobachtung, dass die gemeldeten COVID-19-Todesfälle auch im Jahr 2022 nur einen kleinen Anteil der Gesamtmortalität im Zeitraum Mai-September darstellen (deutschlandweit etwa 3 %) *(eTabelle)*.

Tabelle 2

Geschätzte Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle in den Bundesländern im Sommer (Mai-September) 2022, inklusive 95-%-Konfidenzintervall.

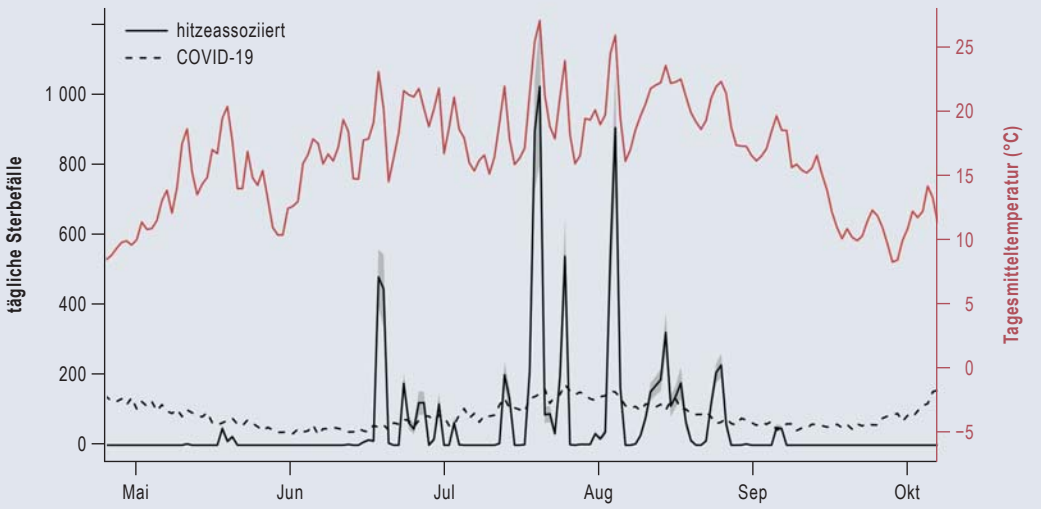
Bundesland	mittlerer Schätzwert [95-%-Konfidenzintervall]
Baden-Württemberg	1 270 [1 070; 1 460]
Bayern	1 040 [670; 1 370]
Berlin	400 [270; 520]
Brandenburg	410 [310; 500]
Bremen	60 [40; 80]
Hamburg	160 [110; 210]
Hessen	570 [450; 700]
Mecklenburg-Vorpommern	190 [120; 250]
Niedersachsen	770 [600; 940]
Nordrhein-Westfalen	2 300 [1 980; 2 620]
Rheinland-Pfalz	510 [410; 600]
Saarland	160 [110; 200]
Sachsen	480 [340; 610]
Sachsen-Anhalt	350 [260; 420]
Schleswig-Holstein	220 [90; 330]
Thüringen	240 [130; 340]

Wir führen zumindest einen Teil der Unterschiede zwischen bisherigen Studien des Robert Koch-Instituts (12, 13) und den vorliegenden Ergebnissen darauf zurück, dass die in diesen Studien genutzten Wochenmittel nur einen Teil der täglichen Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge abbilden können. Weil die Variabilität der Tagesmitteltemperaturen im Vergleich zum wöchentlichen Mittel im Sommer 2022, insbesondere in den nördlichen und östlichen Bundesländern, außergewöhnlich hoch war *(eGrafik 11)*, findet sich besonders für 2022 eine deutliche Differenz zwischen den Ergebnissen der vorliegenden Analyse und den Schätzungen des Robert Koch-Instituts auf Wochenbasis *(eGrafik 12)*. Im Gegensatz dazu war die Temperaturvariabilität beispielsweise im jüngsten Sommer 2023 in allen Bundesländern verhältnismäßig gering *(eGrafik 11)*. Entsprechend fallen die Unterschiede zwischen unseren tagesgenauen Analysen und den wochenbasierten Schätzungen des Robert Koch-Instituts (13) für 2023 vergleichsweise klein aus *(eGrafik 12)*.

Neben der zeitlichen Auflösung der Daten beeinflusst auch die Bestimmung eines Temperaturschwellenwertes maßgeblich die Berechnung der hitzeassoziierten Mortalität. Basierend auf unserem Standardmodell (ERT als Schwellenwert) ermitteln wir in allen Jahren systematisch mehr auf Hitze zurückführbare Sterbefälle als die bisher vorliegenden Studien des Robert Koch-Instituts *(eGrafik 12)*. Bei Betrachtung eines höheren Schwellenwertes (T95) fallen die Unterschiede zwischen unseren Ergebnissen und diesen Studien insgesamt geringer aus *(eGrafik 12)*. Es treten dann deutlicher die Differenzen hervor, die direkt

Geschätzte Anzahl täglicher hitzeassoziierter Sterbefälle (schwarze durchgezogene Linie, mit grauem 95-%-Konfidenzbereich), gemeldete COVID-19-Todesfälle (schwarze gestrichelte Linie) und Tagesmitteltemperaturen (rot) in Deutschland im Sommer 2022. Die Schätzung der hitzeassoziierten Sterbefälle pro Tag berücksichtigt das kumulative Sterberisiko und den Durchschnitt der beobachteten Sterbefälle während der nachfolgenden 21 Tage.

Grafik 3



auf die unterschiedliche zeitliche Auflösung der Daten zurückzuführen sind (insbesondere in den Jahren 2010, 2015 und 2022) *(eGrafik 12)*.

Wenn man unser Ergebnis für den Sommer 2022 mit der Schätzung aus der jüngsten europaweiten Studie vergleicht (14), ergibt sich eine Unterschätzung der hitzeassoziierten Mortalität auf Wochenbasis im Vergleich zur tagesgenauen Analyse von etwa 10 %. Bei Betrachtung des modellbasierten Ergebnisses des Robert Koch-Instituts beträgt die Unterschätzung zwischen 35 % und 50 % *(eGrafik 12)*. Das liegt insbesondere daran, dass in der europäischen Studie (14) verglichen mit unserer Analyse Temperaturschwellenwerte methodisch ähnlicher bestimmt wurden als in den Berechnungen des Robert Koch-Instituts (12, 13). Weitere epidemiologische Studien mit Aufschlüsselung nach Alter, Geschlecht und Todesursachen zusammen mit physiologischen Untersuchungen zu Hitzestress sind notwendig, um die Schwellentemperatur weiter einzugrenzen, ab der ein kausaler Zusammenhang zwischen Hitzeexposition und Mortalitätsrisiko angenommen werden kann.

Zusammenfassend stellen wir fest, dass Hitze ein ernst zu nehmendes Gesundheitsrisiko in Deutschland darstellt, wie unsere Ergebnisse eindrucksvoll unterstreichen. Ein Sommer wie 2022 wird bei fortschreitendem Klimawandel schon in den kommenden Jahrzehnten als kühler Sommer gelten (32). Ohne Bemühungen, bestehende Hitzeschutzpläne auszubauen und zu verbessern und besonders vulnerable Bevölkerungsgruppen zu schützen (33, 34), könnte die hitzeassoziierte Mortalität in Deutschland deutlich zunehmen (4). In diesem Zusammenhang ist eine konsequente Erfassung der hitzeassoziierten Mortalität ein wichtiger Baustein einer umfassenden Gesundheitsvorsorge. Analysen auf Wochenbasis könnten die hitzeassoziierte Mortalität jedoch im Vergleich zu Tagesauswertungen zumindest in Einzeljahren deutlich unterschätzen.

Interessenkonflikt
Die Autorinnen und der Autor erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Manuskriptdaten
eingereicht: 23.06.2023, revidierte Fassung angenommen: 16.11.2023

Literatur

1. Romanello M, Di Napoli C, Drummond P, et al.: The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. Lancet 2022; 400: 1619–54.
2. Matthies-Wiesler F, Herrmann M, Schulz C, et al.: The Lancet Countdown on Health and Climate Change Policy—Policy Brief für Deutschland 2021. www.klimawandel-gesundheit.de/wp-content/uploads/2021/10/20211020_Lancet-Countdown-Policy-Germany-2021_Document_v2.pdf (last accessed on 3 May 2023).
3. Breitner S, Wolf K, Devlin RB, Diaz-sanchez D, Peters A, Schneider A: Short-term effects of air temperature on mortality and effect modification by air pollution in three cities of Bavaria, Germany: a time-series analysis. Sci Total Environ 2014; 486: 49–61.
4. 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.
5. 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 2017, 8: 224.
6. Karlsson M, Ziebarth NR: Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: comprehensive evidence from Germany. J Environ Econ Manage 2018; 91: 93–117.
7. 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.
8. 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: 124080.
9. 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.

10. van Daalen KR, Romanello M, Rocklöv J, et al.: The 2022 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: towards a climate resilient future. Lancet Public Health 2022; 7: e942–65.
11. Deutscher Wetterdienst: Deutschlandwetter im Sommer 2022. www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2022/20220830_deutschlandwetter_sommer2022_news.html (last accessed on 25 March 2023).
12. Winklmayr C, an der Heiden M: Hitzebedingte Mortalität in Deutschland 2022. Epid Bull 2022; 42: 3–9.
13. an der Heiden M, Winklmayr C, Buchien S, Schranz M, RKI-Geschäftsstelle für Klimawandel & Gesundheit, Diercke M, Bremer V: Wochenbericht zur hitzebedingten Mortalität KW 38/2023 vom 05.10.2023; Robert Koch-Institut; DOI: 10.25646/11720.
14. Ballester J, Quijal-Zamorano M, Méndez Turrubiates RB, et al.: Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. Nat Med 2023; 29: 1857–66.
15. Tobías A, Armstrong B, Gasparrini A: Investigating uncertainty in the minimum mortality temperature—methods and application to 52 Spanish cities. Epidemiology 2017; 28: 72–6.
16. Siebert H, Uphoff H, Grewe HA: [Monitoring heat-related mortality in Hesse]. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 2019; 62: 580–8.
17. 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.
18. Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, et al.: Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. Lancet 2015; 386: 369–75.
19. Destatis: Sterbefälle, Fallzahlen nach Tagen, Wochen, Monaten, Altersgruppen, Geschlecht und Bundesländern für Deutschland, 2016–2023. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Sterbefaelle-Lebenserwartung/Tabellen/sonderauswertung-sterbefaelle.html (last accessed on 17 October 2023).
20. Destatis: Sterbefälle, Fallzahlen nach Tagen, Wochen, Monaten, Altersgruppen, Geschlecht und Bundesländern für Deutschland, 2000–2015. www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Sterbefaelle-Lebenserwartung/Tabellen/sonderauswertung-sterbefaelle-endgueltige-daten.html?nn=209016 (last accessed on 27 January 2023).
21. Destatis: Fortschreibung des Bevölkerungsstandes. www-genesis.destatis.de/ (last accessed on 4 October 2023).
22. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al.: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS): www.cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview (last accessed on 4 October 2023).
23. Gasparrini A, Leone M: Attributable risk from distributed lag models. BMC Med Res Methodol 2014; 14: 55.
24. Petitti DB, Hondula DM, Yang S, Harlan SL, Chowell G: Multiple trigger points for quantifying heat-health impacts: new evidence from a hot climate. Environ Health Perspect 2016; 124: 176–83.
25. Rai M, Breitner S, Huber V, Zhang S, Peters A, Schneider A: Temporal variation in the association between temperature and cause-specific mortality in 15 German cities. Environ Res 2023; 229: 115668.
26. Matzarakis A, Laschewski D, Muthers S: The heat health warning system in Germany—application and warnings for 2005 to 2019. Atmosphere 2020; 11: 170.
27. Blättner B, Grewe HA, Janson D, et al.: Arbeitshilfe zur Entwicklung und Implementierung eines Hitzeaktionsplans für Kommunen. www.hs-fulda.de/fileadmin/user_upload/FB_Pflege_und_Gesundheit/Forschung___Entwicklung/Klimawandel_Gesundheit/Arbeitshilfe_zur_Entwicklung_und_Implementierung_eines_Hitzeaktionsplans_fuer_Kommunen_21.03_final.pdf (last accessed on 28 March 2023).
28. Sera F, Hashizume M, Honda Y, et al.: Air conditioning and heat-related mortality—a multi-country longitudinal study. Epidemiology 2020; 31: 779–87.
29. Nottmeyer L, Armstrong B, Lowe R, et al.: The association of COVID-19 incidence with temperature, humidity, and UV radiation—a global multicity analysis. Sci Total Environ 2023: 854: 158636.
30. Sera F, Armstrong B, Abbott S, et al.: A cross-sectional analysis of meteorological factors and SARS-CoV-2 transmission in 409 cities across 26 countries. Nat Commun 2021; 12: 1–11.
31. Presbitero A, Melnikov VR, Krzhizhanovskaya VV, Sloot PMA: A unifying model to estimate the effect of heat stress in the human innate immunity during physical activities. Sci Rep 2021; 11: 1–18.
32. Freychet N, Hegerl GC, Lord NS, Lo YET, Mitchell D, Collins M: Robust increase in population exposure to heat stress with increasing global warming. Environ Res Lett 2022; 17: 064049.
33. Bund/Länder Ad-hoc Arbeitsgruppe: Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 2017; 60: 662–72.
34. Kaiser T, Kind C, Dudda L, Sander K: Klimawandel, Hitze und Gesundheit: Stand der gesundheitlichen Hitzevorsorge in Deutschland und Unterstützungsbedarf der Bundesländer und Kommunen. UMID: Umwelt und Mensch – Informationsdienst, 2021, 1: 27–37; www.adelphi.de/en/publication/klimawandel-hitze-und-gesundheit (last accessed on 3 May 2023).

Anschrift der korrespondierenden Verfasserin
Dr. rer. nat. Veronika Huber
IBE-Lehrstuhl für Epidemiologie am Helmholtz Zentrum München
Ludwig-Maximilians-Universität (LMU)
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Neuherberg
veronika.huber@ibe.med.uni-muenchen.de

Zitierweise
Huber V, Breitner-Busch S, He C, Matthies-Wiesler F, Peters A, Schneider A: Heat-related mortality in the extreme summer of 2022—an analysis based on daily data. Dtsch Arztebl Int 2024; 121: 79–85. DOI: 10.3238/arztebl.m2023.0254

Zusatzmaterial
eMethodenteil, eTabellen, eGrafiken:
www.aerzteblatt.de/m2023.0254 oder über QR-Code

Die englische Version des Artikels im Internet:
www.aerzteblatt-international.de

Einreichung von Manuskripten

- Die Redaktion freut sich über die Einreichung von Originalarbeiten, systematischen Übersichtsartikeln, narrativen Übersichtsarbeiten und Kurzmitteilungen.
- Thematische Schwerpunkte bei Originalarbeiten sind insbesondere Studien zur klinischen Medizin und zur Epidemiologie. Arbeiten aus dem Bereich der Versorgungsforschung können ebenfalls eingereicht werden.
- Das auf zwei Druckseiten beschränkte Format der Kurzmitteilung eignet sich insbesondere zur Darstellung kompakter Forschungsprojekte.
- Übersichtsarbeiten können aus allen klinischen Spezialgebieten eingereicht werden, sofern das Thema für Leserinnen und Leser aus anderen Fachdisziplinen relevant ist.

eSupplement

Hitzeassoziierte Mortalität im Extremsommer 2022 – eine Analyse auf Basis täglicher Daten

Veronika Huber et al.

veronika.huber@ibe.med.uni-muenchen.de

Inhalt:

eMethoden

eTabelle

eGrafiken 1-12

eMethoden

Schritt 1: Modellierung der Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge in den einzelnen Bundesländern

Auf Basis der Bundesland-spezifischen Zeitreihen der täglichen Sterbefälle und Tagesmitteltemperaturen in den Zeiträumen 2000-2010 und 2011-2022 (insgesamt n = 8401 pro Bundesland) berechneten wir Quasi-Poisson-Regressionsmodelle entsprechend Gasparrini et al. (18). Darin modellierten wir die Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge mit einem sogenannten „Distributed-Lag Non-linear Model“ (DLNM), welches die verzögerte Wirkung der Temperaturexposition auf das Mortalitätsrisiko abbildet. Das DLNM bestand aus einer kubischen Spline Funktion mit drei Knotenstellen an den 10ten, 75sten und 90sten Perzentilen der Bundesland-spezifischen Temperaturverteilung und einer weiteren kubischen Spline Funktion zur Modellierung der Zeitverzögerung von bis zu 21 Tagen. Eine Betrachtung von 21 „Lag“-Tagen ist eine übliche Annahme bei der Modellierung temperaturbedingter Mortalität (18), die bezüglich Hitze auch kurzfristige Mortalitätsverschiebungen (sogenanntes „harvesting“) miteinbezieht (23). Wir kontrollierten für den Wochentag als kategorielle Variable und mögliche Saison- und Langzeittrends über eine Spline Funktion mit 8 Freiheitsgraden pro Jahr.

Schritt 2: Multivariate Meta-Regression der Bundesland-spezifischen reduzierten Modellkoeffizienten

Wir fassten die reduzierten Modellkoeffizienten der Bundesländer, welche das kumulierte Mortalitätsrisiko summiert über alle berücksichtigten Zeitschritte („Lags“ 1 bis 21) widerspiegeln, in einem multivariaten Meta-Regressionsmodell zusammen. Das Modell enthielt neben dem y-Achsenabschnitt als Meta-Regressoren die durchschnittliche Jahrestemperatur und die maximale Temperaturspanne in den Bundesländern. Dabei wurden die Bundesländer alle gleich gewichtet. Aus diesem Modell errechneten wir die sogenannten „Best-Linear Unbiased Predictors“ (BLUPs) als Kompromiss zwischen den zum Teil instabileren Schätzungen der Modellkoeffizienten aus dem ersten Schritt und dem gepoolten Schätzer aus der Meta-Regression. Abbildungen S1a und S1b zeigen, dass die initialen Schätzungen der Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge in unserer Analyse nur in wenigen Bundesländern von den BLUP-basierten Schätzungen abweichen.

Schritt 3: Berechnung der hitzeassoziierten Übersterblichkeit

Zur Darstellung der Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge als ‚relatives Risiko‘ (RR) und zur Berechnung der hitzeassoziierten Übersterblichkeit muss im nächsten Schritt eine Referenztemperatur ermittelt werden, bei welcher der Definition nach kein hitzeassoziiertes Mortalitätsrisiko auftritt. Diese sogenannte Temperatur des minimalen Mortalitätsrisikos (T_{mm}) berechneten wir entsprechend üblichen Methoden (18) entlang des 1st bis 99sten Temperaturperzentils als das Minimum der Kurve, die sich aus den BLUPs ergibt. Das ‚relative Risiko‘ beschreibt dann die Sterbewahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Temperatur T im

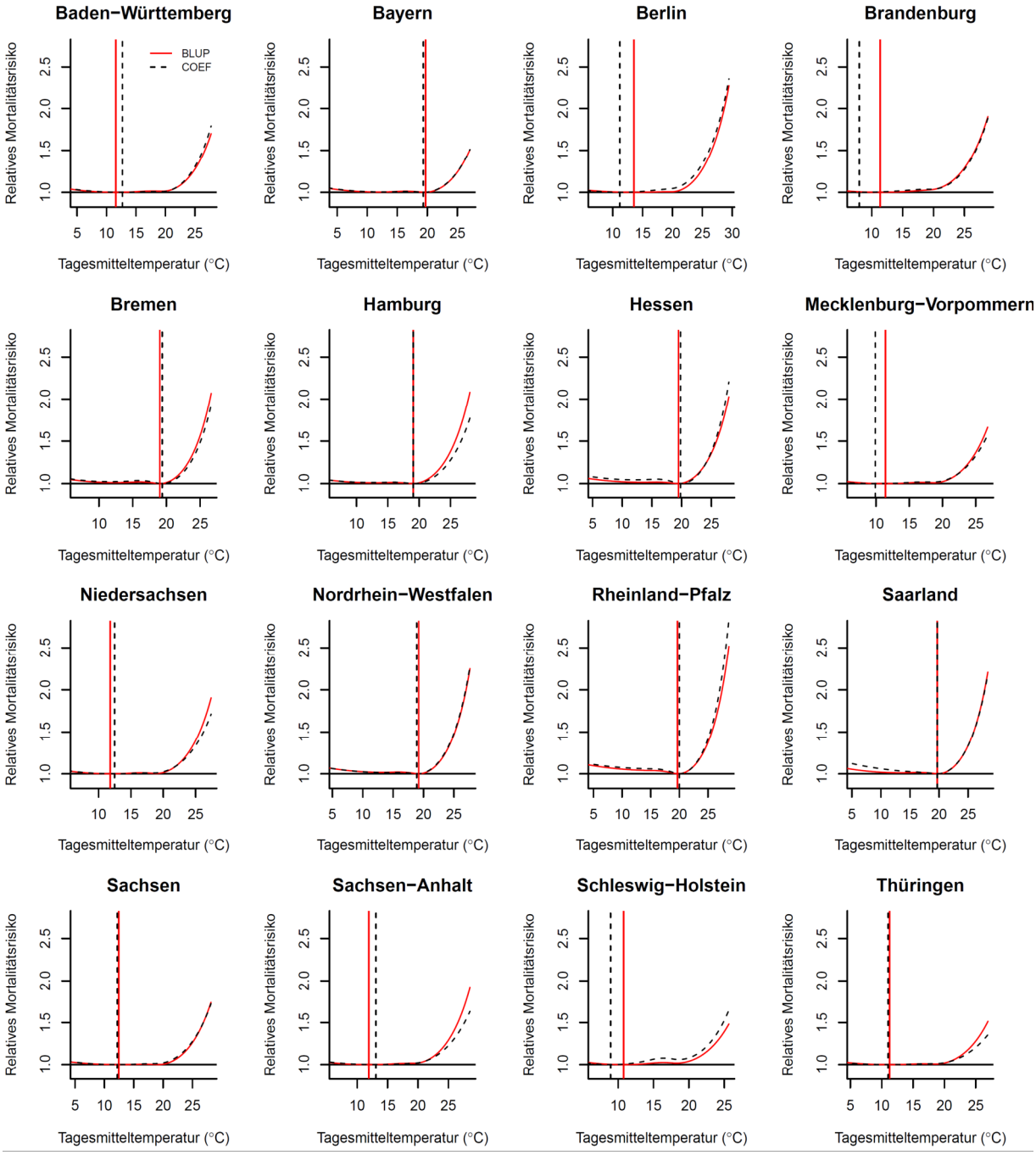
Vergleich zur Sterbewahrscheinlichkeit bei T_{mm}. Die Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle S am Tag t mit der Temperatur T ergibt sich, in Anlehnung an die „Vorwärts-Methode“ von Gasparrini & Leone (23), als

$$S_{T,t} = \begin{cases} \left(1 - e^{-(f(T_t,\theta) - f(T_{mm},\theta))}\right)\left(\sum_{l=0}^{L} \frac{G_{t+l}}{L+1}\right), \ wenn\, T_t > ERT \\ 0, \ wenn\, T_t \leq ERT \end{cases} \qquad \text{(Gl. 1)}$$

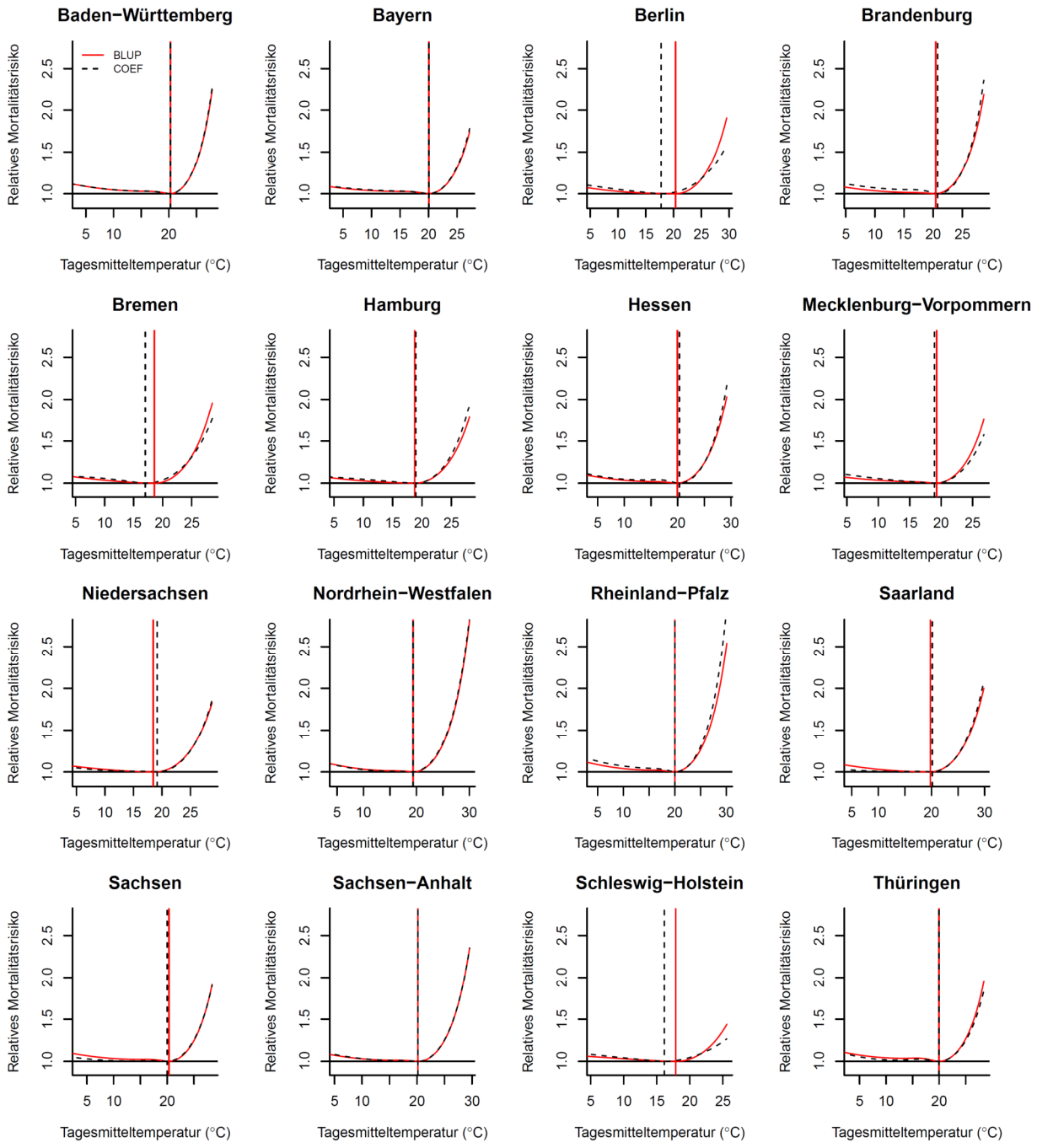
wo f und θ den kumulativen Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhang beschreiben, der über die BLUPs aus dem zweiten Analyseschritt gegeben ist. G steht für die registrierte Gesamtmortalität, L beschreibt die maximale Lag-Zahl (hier 21 Tage), und ERT bezeichnet die Exzess-Risiko-Temperatur (siehe Methodenteil im Haupttext). In unserer Sensitivitätsanalyse ersetzten wir ERT in Gl. 1 durch das 95-% Perzentil der Tagesmitteltemperaturen (T95). Die 95% empirischen Konfidenzintervalle (KI) wurden über ein Bootstrap-Verfahren berechnet, bei dem wir 1.000 Ziehungen aus einer multivariaten Normalverteilung der reduzierten Modellparameter (BLUPs) vornahmen, entsprechend den Annahmen bei Gasparrini et al. (18). Da wir die Gesamtmortalität betrachten, gehen in unsere Analyse auch möglicherweise indirekt hitzebedingte Unfalltote (z.B. durch Motorrad- oder Badeunfälle) ein. Wir können jedoch keine Aussage über den Anteil dieser Todesformen an der gesamten hitzeassoziierten Sterblichkeit machen, weil uns die Daten zu den Todesursachen nicht zugänglich sind.

eTabelle Prozentualer Anzahl der gemeldeten COVID-19-Todefälle an der Gesamtmortalität im Zeitraum Mai-September in den Jahre 2020-2022, für alle Bundesländer und deutschlandweit.

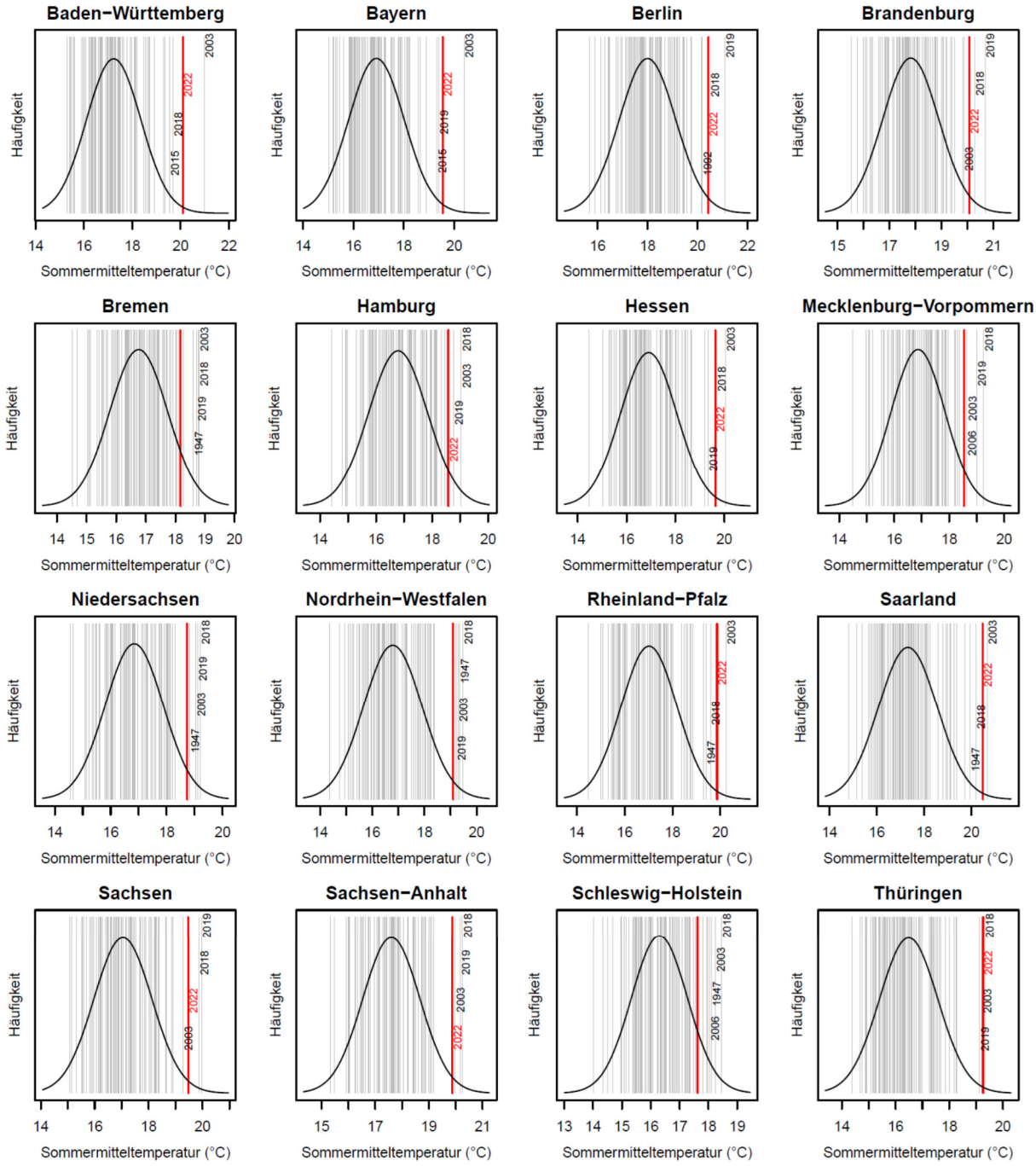
	2020	**2021**	**2022**
Baden-Württemberg	0,9	2,3	2,6
Bayern	1,0	2,2	3,4
Berlin	0,5	1,3	1,9
Brandenburg	0,2	1,4	2,1
Bremen	0,9	1,4	2,4
Hamburg	0,9	2,6	5,8
Hessen	0,7	2,6	3,3
Mecklenburg-Vorpommern	0,0	1,4	3,1
Niedersachsen	0,5	1,4	4,3
Nordrhein-Westfalen	0,7	2,3	2,7
Rheinland-Pfalz	0,4	1,6	2,6
Saarland	0,8	1,4	3,1
Sachsen	0,3	3,6	2,7
Sachsen-Anhalt	0,2	2,1	2,6
Schleswig-Holstein	0,3	1,0	2,5
Thüringen	0,9	3,1	3,1
Deutschland	0,6	2,1	3,0



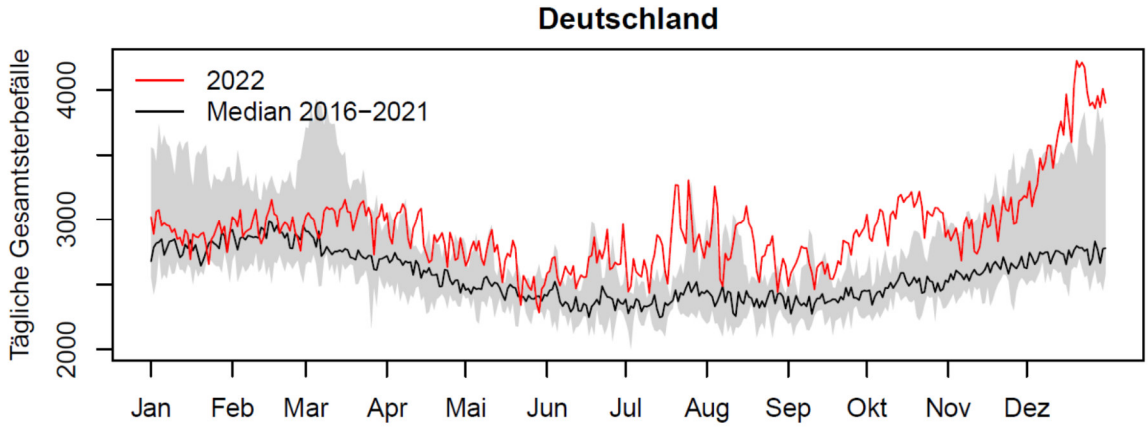
eGrafik 1a Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge auf Basis der geschätzten Modellkoeffizienten aus dem ersten (COEF, schwarz) und zweiten Analyseschritt (BLUP, rot) für den Zeitraum 2000-2010 (siehe eMethoden). Die vertikalen Linien zeigen die Temperatur des minimalen Mortalitätsrisikos (T_{mm}).



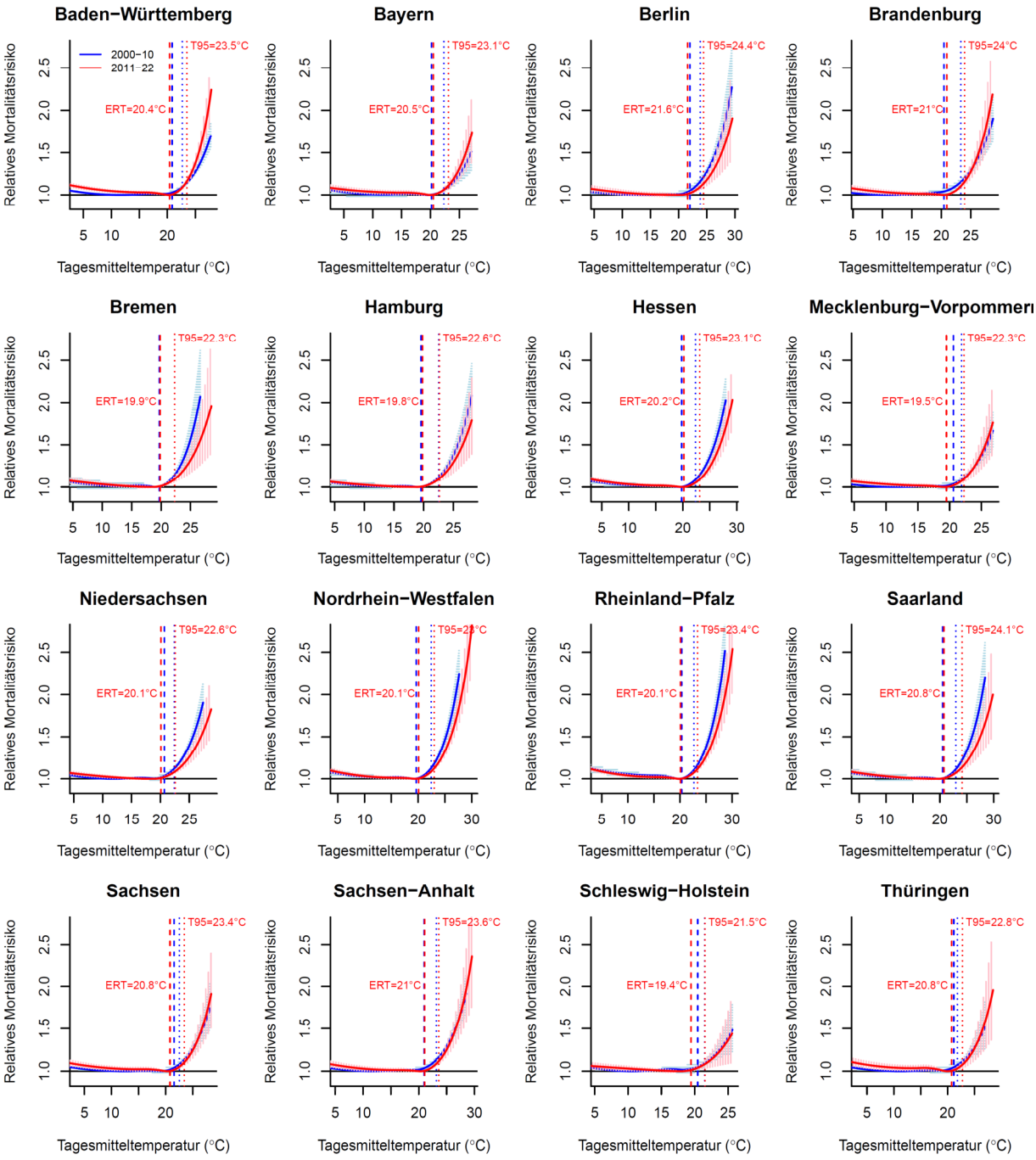
eGrafik 1b Wie eGrafik 1a, aber für den Zeitraum 2011-2022.



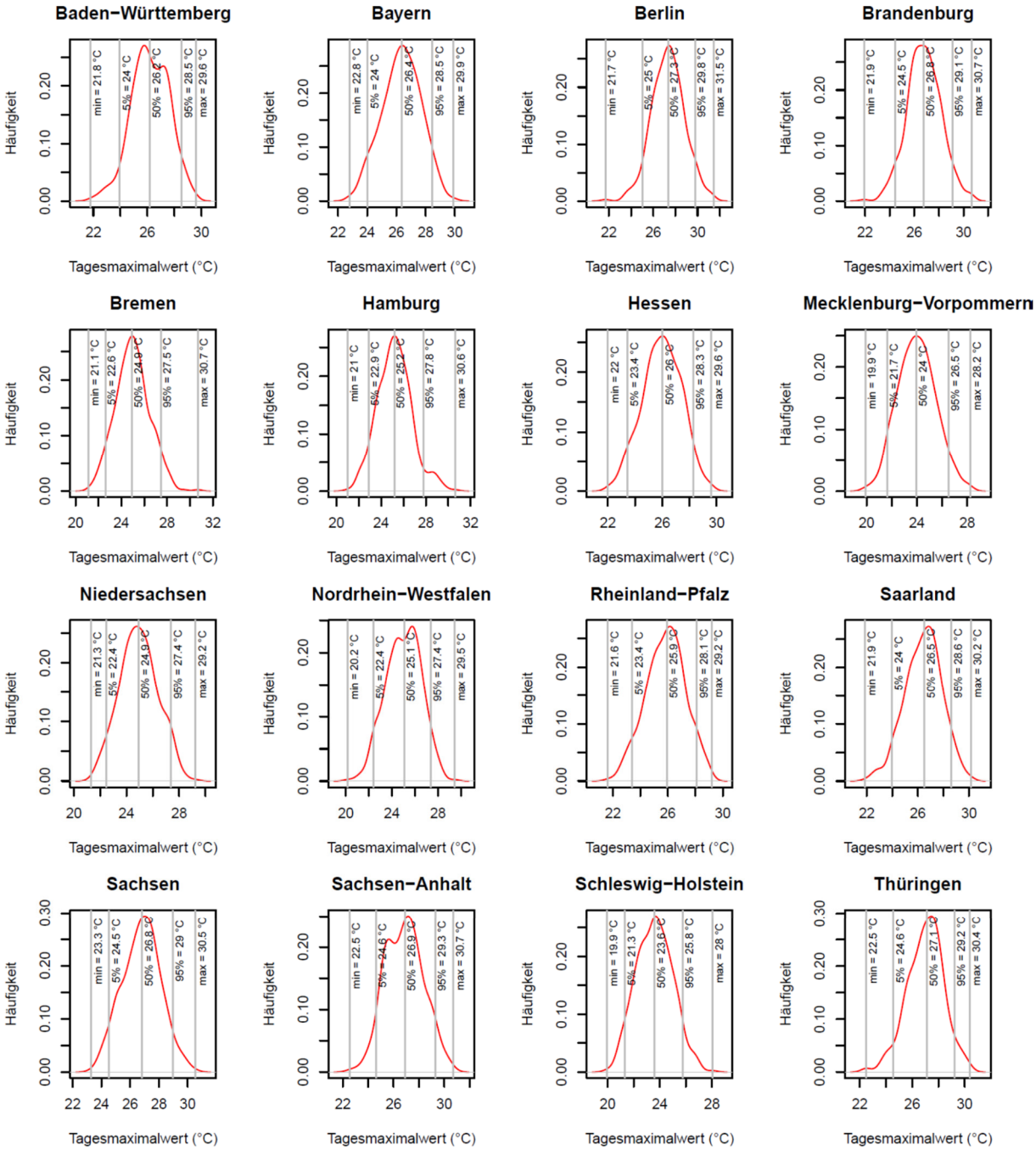
eGrafik 2 Häufigkeitsverteilung (schwarz) der mittleren Temperatur in den 16 Bundesländern während der Sommermonate Juni, Juli, August (grau) im Zeitraum 1940-2023. Die vier wärmsten Jahre sind beschriftet. Das Jahr 2022 ist rot hervorgehoben.



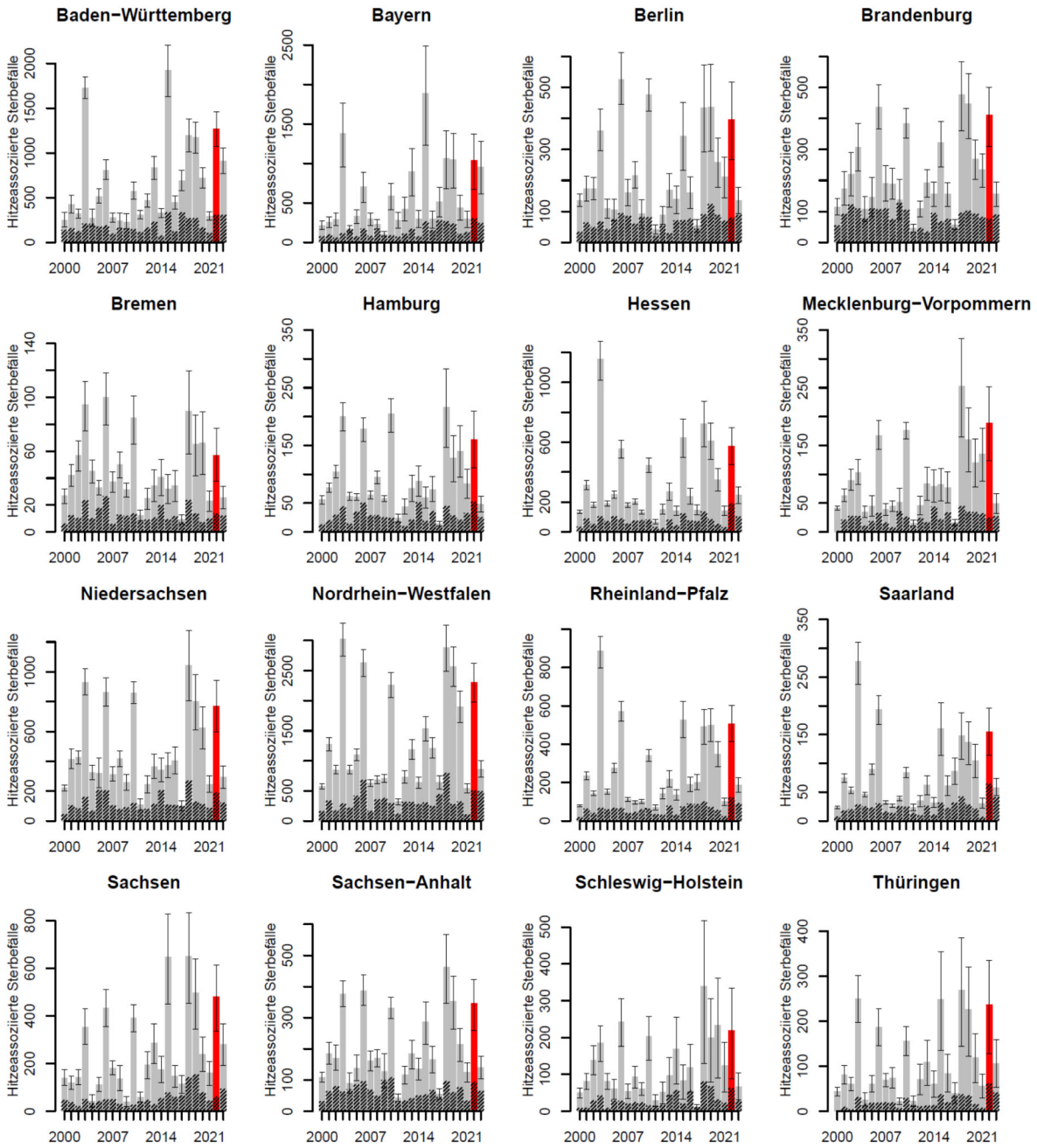
eGrafik 3 Tägliche Gesamtsterbefälle in Deutschland im Jahr 2022 (rot) im Vergleich zum Median der Jahre 2016-2021 (schwarze Linie, Spannweite: grauer Bereich).



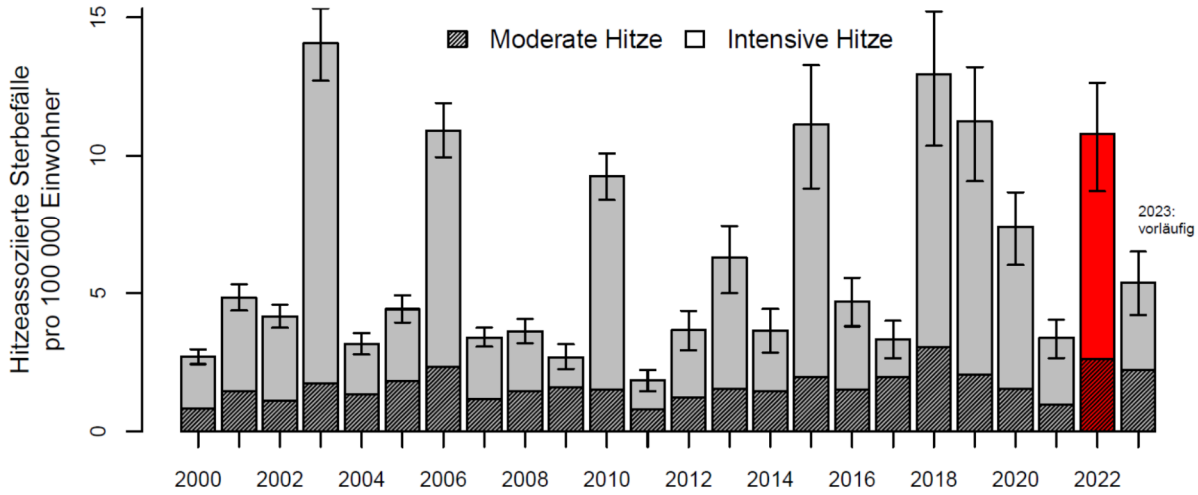
eGrafik 4 Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhänge (Mai-September) in den Zeiträumen 2000-2010 (blau) und 2011-2022 (rot) mit 95% Konfidenzbereich (schraffiert) für alle Bundesländer. Die gestrichelten Linien entsprechen den Exzess-Risiko-Temperaturen (ERT), ab denen dem Modell nach im jeweiligen Zeitraum ein signifikantes Mortalitätsrisiko auftritt. Die gepunkteten Linien zeigen die 95-% Temperaturperzentile (T95), die in der Sensitivitätsanalyse zur Definition „moderater“ und „intensiver“ Hitze genutzt werden. ERT und T95 sind für den Zeitraum 2011-2022 beziffert.



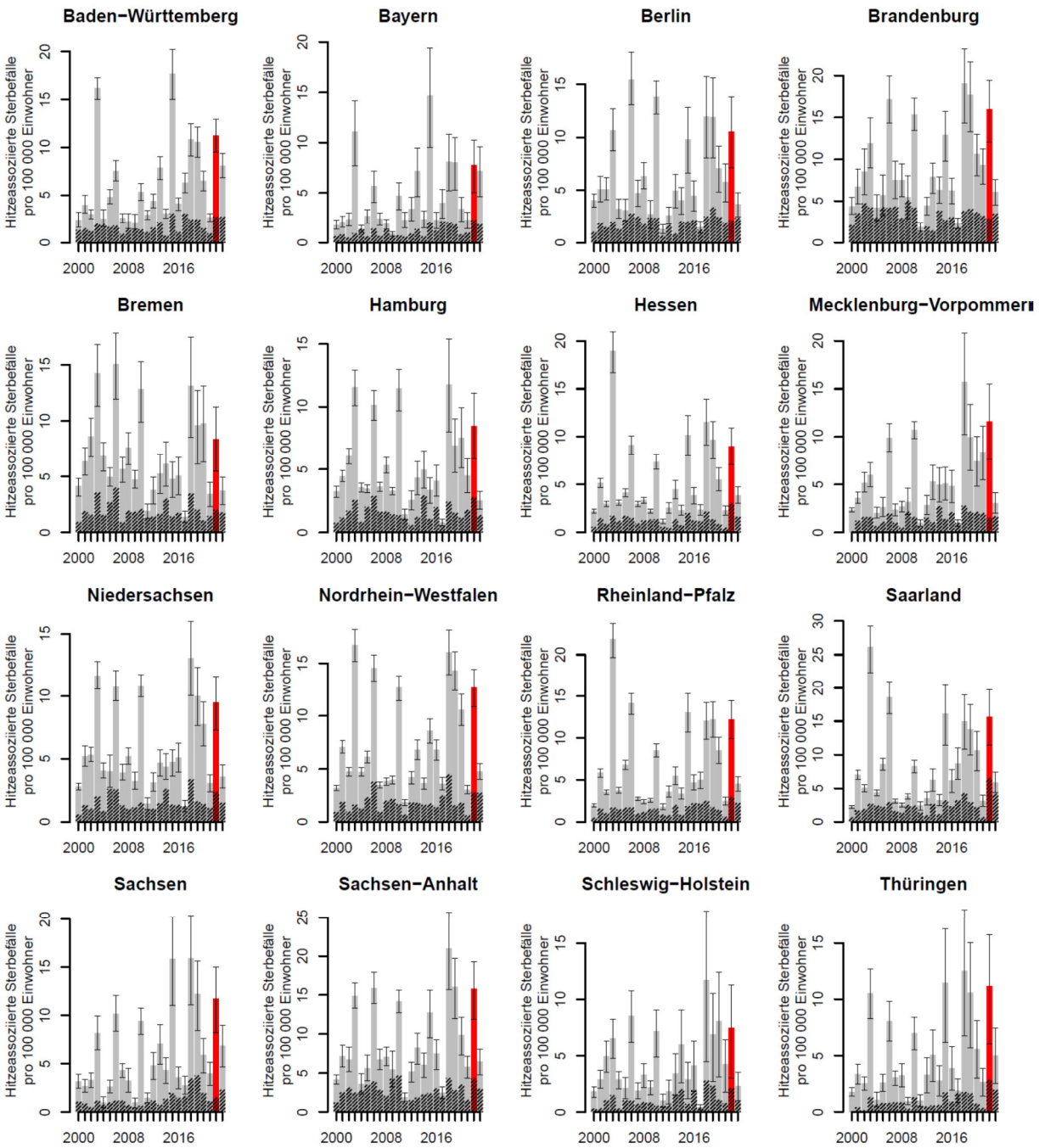
eGrafik 5 Häufigkeitsverteilung der täglichen Temperaturhöchstwerte in den Bundesländern im Intervall der Tagesmitteltemperatur ERT±1. Hier entspricht ERT dem geschätzten Wert der zweiten Analyseperiode 2011-2022 (vgl. Abb. S4).



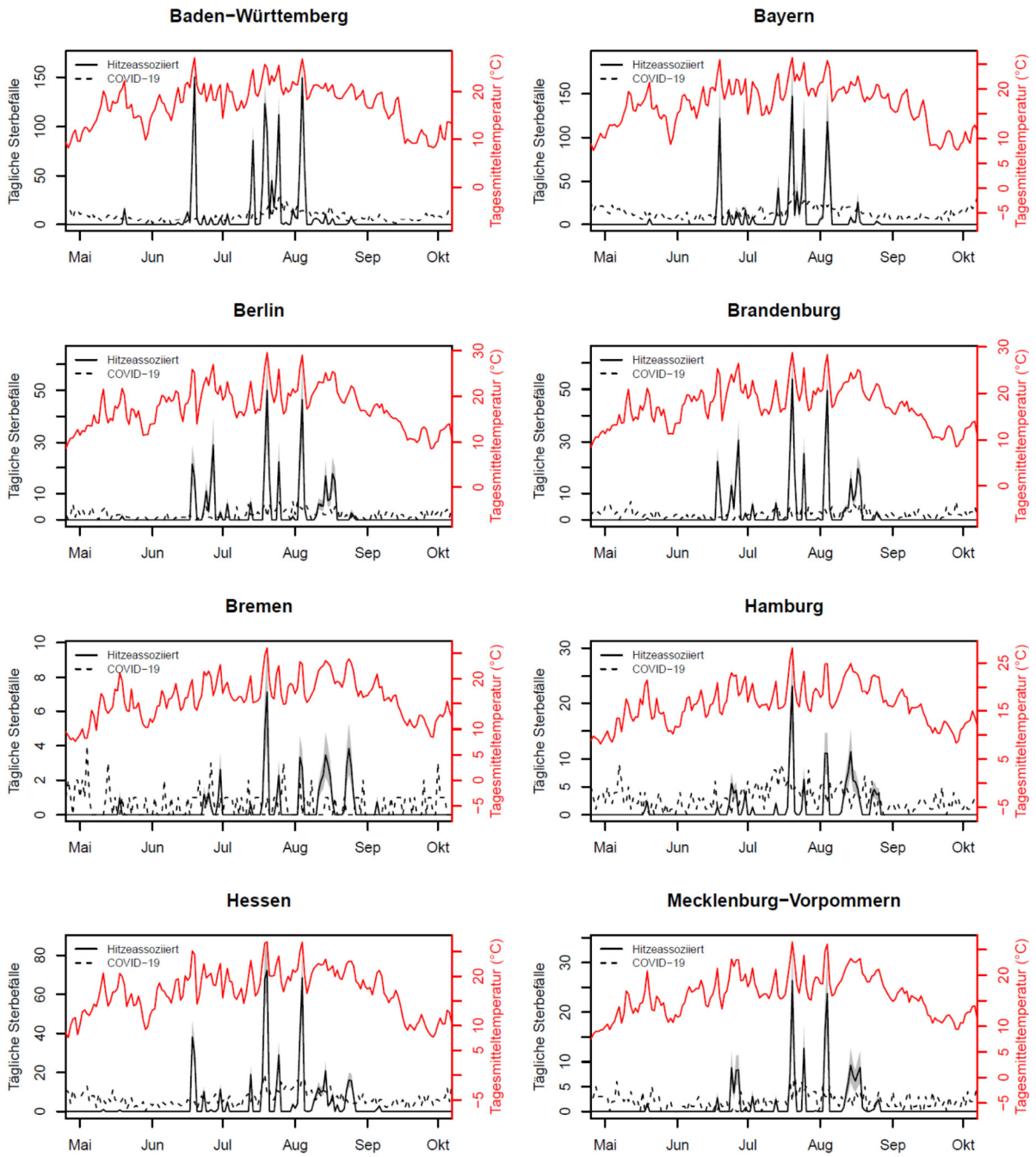
eGrafik 6 Geschätzte Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle pro Jahr in den Bundesländern, basierend auf den Temperatur-Mortalitäts-Zusammenhängen in den Zeiträumen 2000-2010 und 2011-2022 (Abb. S4). Die Unsicherheitsbalken zeigen die 95% Konfidenzintervalle. Schraffiert dargestellt ist der Anteil der Sterbefälle, der auf ‚moderate' in Abgrenzung zu ‚intensiver' Hitze zurückzuführen ist, entsprechend den Temperaturschwellenwerten (ERT und T95) in Abb. S4. Für die Zahlen aus 2022 (rot) siehe auch Tabelle S1. Die Zahlen für 2023 stellen eine vorläufige Schätzung dar.



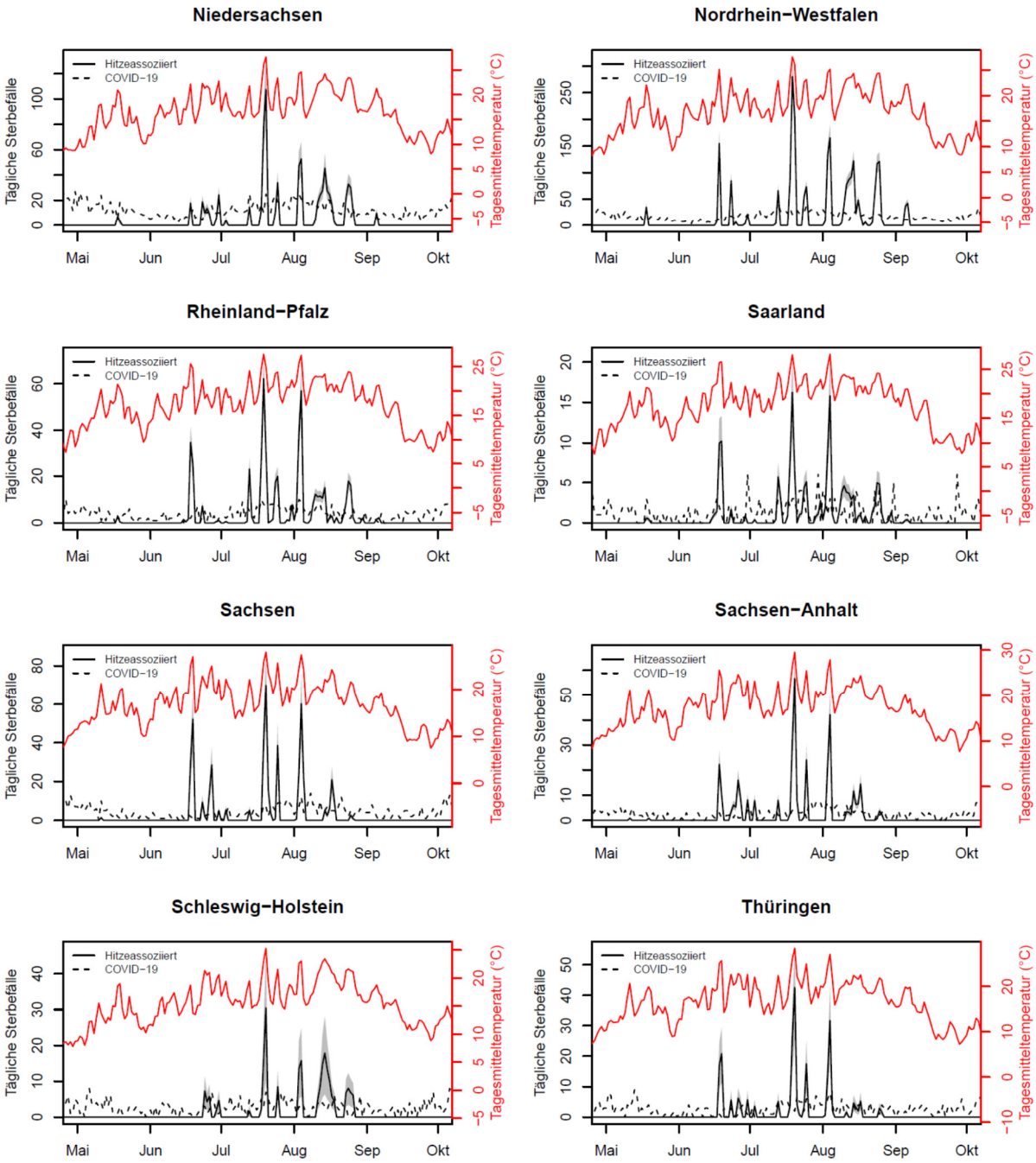
eGrafik 7 Wie Grafik 2, aber für Sterbefallraten pro 100.000 Einwohner.



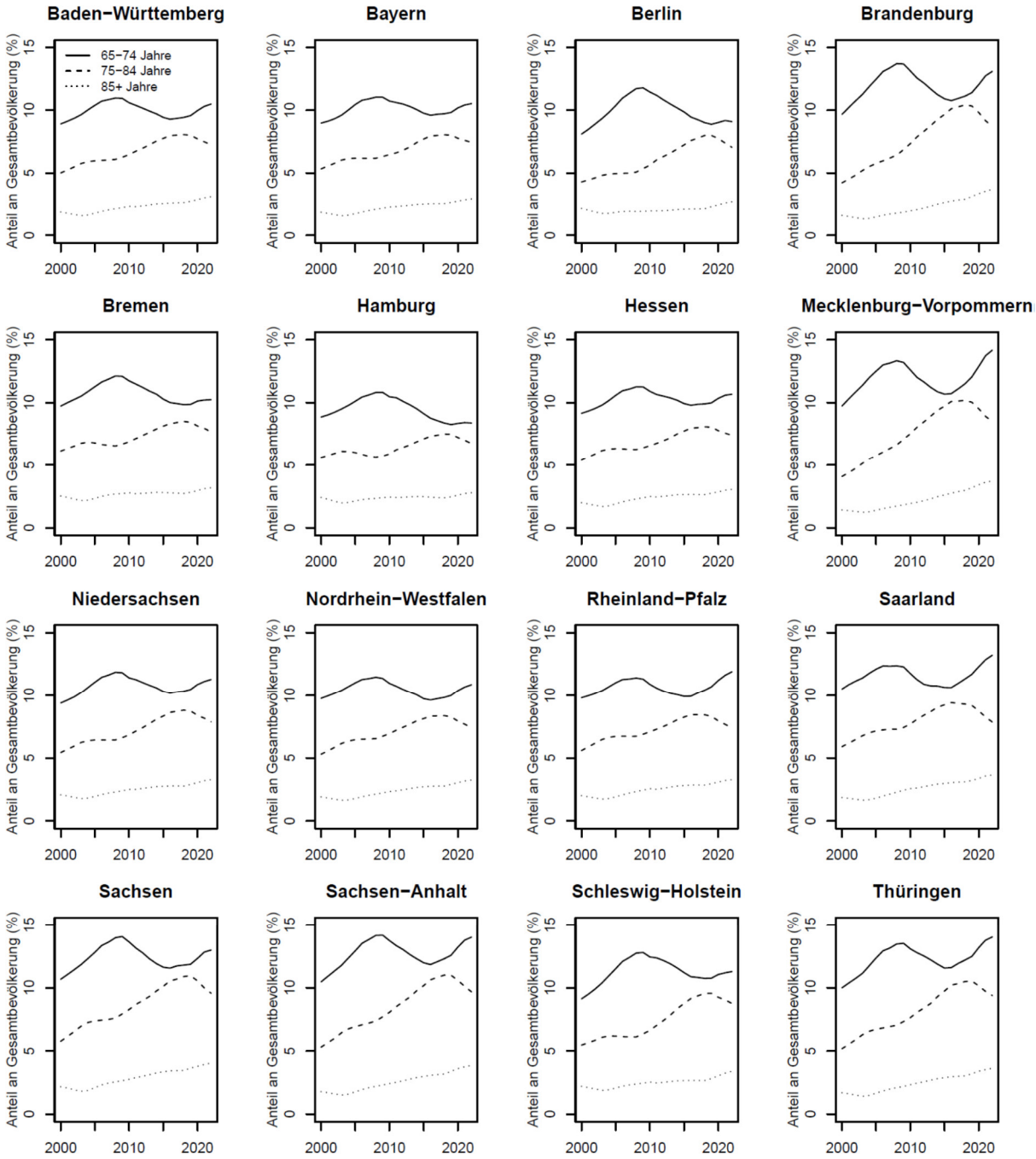
eGrafik 8 Wie eGrafik 6, aber für Sterbefallraten pro 100.000 Einwohner.



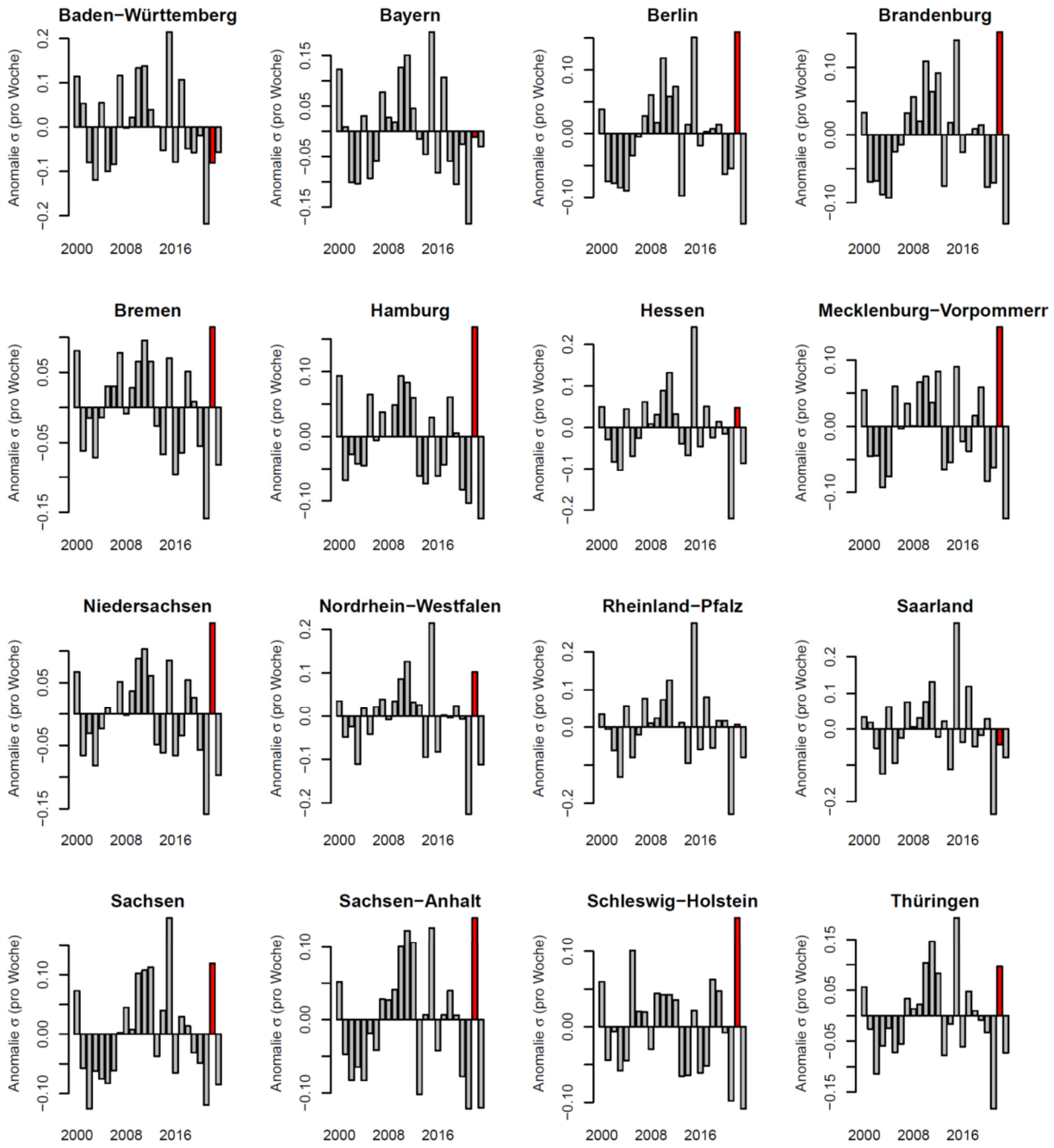
eGrafik 9a Geschätzte Anzahl täglicher hitzeassoziierter Sterbefälle (schwarze durchgezogene Linie, mit grauem 95% Konfidenzbereich), gemeldete COVID-19 Todesfälle (schwarze gestrichelte Linie) und Tagesmitteltemperaturen (rot) in den Bundesländern im Sommer 2022.



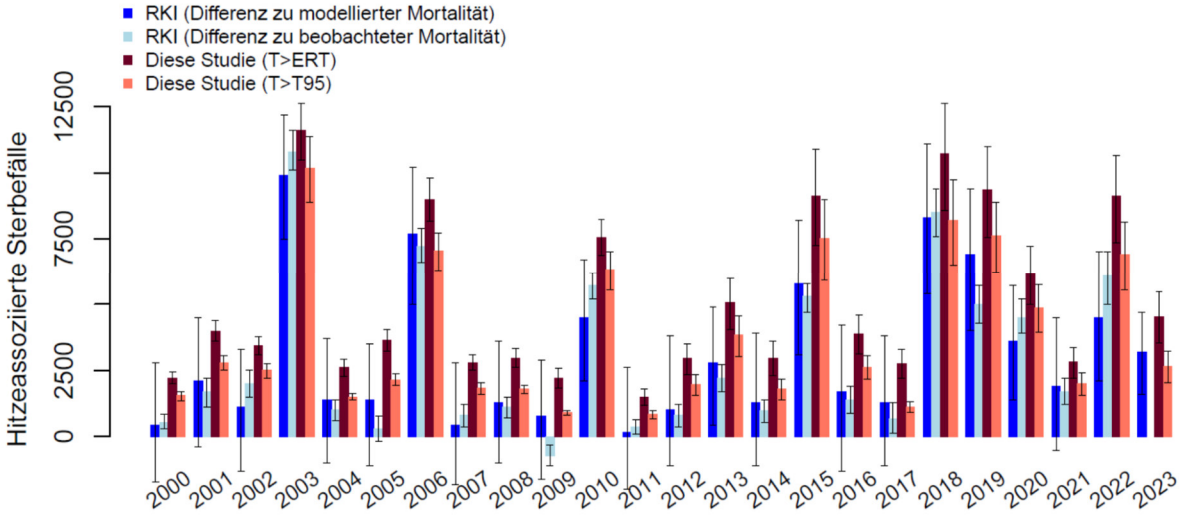
eGrafik 9b Geschätzte Anzahl täglicher hitzeassoziierter Sterbefälle (schwarze durchgezogene Linie, mit grauem 95% Konfidenzbereich), gemeldete COVID-19 Todesfälle (schwarze gestrichelte Linie) und Tagesmitteltemperaturen (rot) in den Bundesländern im Sommer 2022.



eGrafik 10 Prozentualer Anteil der Altersgruppen 65-74, 75-84 und 85+ Jahre an der Gesamtbevölkerung im Zeitraum 2000 bis 2022. Die Daten entstammen der Genesis Datenbank des Statistischen Bundesamtes (21).



eGrafik 11 Durchschnittliche Standardabweichung der Tagesmitteltemperatur pro Woche in den Kalenderwochen 22 bis 35 (ungefähr Juni-August), als Abweichung vom langjährigen Mittel für den Zeitraum 2000-2023 für alle Bundesländer. Der Sommer 2022 ist rot hervorgehoben.



eGrafik 12 Geschätzte Anzahl hitzeassoziierter Sterbefälle in Deutschland im Zeitraum 2000-2023, entsprechend Schätzungen des Robert Koch-Instituts (12, 13) (dunkelblau und hellblau), und geschätzt in dieser Studie basierend auf unterschiedlichen Temperaturschwellenwerten (ERT und T95, siehe eGrafik 4) (dunkelrot und hellrot). Die Unsicherheitsbalken zeigen die 95% Konfidenzintervalle. Zum Zeitpunkt der Analyse stand die Schätzung des Robert Koch Instituts basierend auf der Differenz zur beobachteten Mortalität (hellblau) für das Jahr 2023 noch nicht zur Verfügung.