

Originalarbeit

Zukünftige Häufigkeit temperaturbedingter Herzinfarkte in der Region Augsburg

Eine Hochrechnung auf der Grundlage der Zielwerte der Pariser UN-Klimakonferenz

Kai Chen, Susanne Breitner, Kathrin Wolf, Masna Rai, Christa Meisinger, Margit Heier, Bernhard Kuch, Annette Peters, Alexandra Schneider für die KORA-Forschungsgruppe

Zusammenfassung

Hintergrund: Erhebliche Anstrengungen müssen unternommen werden, um das von der Pariser UN-Klimakonferenz 2015 beschlossene Klimaabkommen umzusetzen, das die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau vorsieht. Unsere Zielsetzung war, die Zahl künftiger temperaturbedingter Herzinfarkte (HI) in Augsburg zu prognostizieren, ausgehend von einer globalen Erwärmung um 1,5 °C, 2 °C oder 3 °C.

Methoden: Unter Verwendung von täglichen HI-Zeitreihen und Temperaturprojektionen wurde basierend auf zwei Klimaszenarien jeweils die Zahl der temperaturbedingten Herzinfarkte bei unterschiedlichen Erwärmungsleveln prognostiziert. Bevölkerungsstruktur und Adaptationsgrad der Bevölkerung wurden dabei als konstant angenommen.

Ergebnisse: In einem emissionsarmen Szenario, das die Erwärmung im 21. Jahrhundert auf unter 2 °C begrenzt, wird die Zahl der temperaturbedingten Herzinfarkte bei einer globalen Erwärmung um 1,5 °C mit –6 Fällen (95%-Konfidenzintervall: [–60; 50]) pro Jahrzehnt leicht abnehmen. In einem Szenario mit hohen Emissionen, das die Ziele des Übereinkommens von Paris überschreitet, steigt pro Jahrzehnt die Zahl der temperaturbedingten Herzinfarkte bei Erwärmung um 2 °C um 18 [–64; 117] beziehungsweise bei Erwärmung um 3 °C um 63 [–83; 257] Fälle an.

Fazit: Die künftige Belastung durch temperaturbedingte Herzinfarkt-Fälle in Augsburg wird bei einer globalen Erwärmung um 2 °C beziehungsweise 3 °C höher liegen als bei einer Erwärmung um 1,5 °C. Die Erfüllung des Übereinkommens von Paris mit Eindämmung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C ist daher essenziell, um durch den Klimawandel verursachte zusätzliche Herzinfarkte zu vermeiden.

Zitierweise

Chen K, Breitner S, Wolf K, Rai M, Meisinger C, Heier M, Kuch B, Peters A, Schneider A, on behalf of the KORA Study Group: Projection of temperature-related myocardial infarction in Augsburg, Germany: moving on from the Paris Agreement on Climate Change. Dtsch Arztebl Int 2019; 116: 521–7. DOI: 10.3238/arztebl.2019.0521

Institut für Epidemiologie, Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt: Kai Chen PhD, Dr. rer. nat. Susanne Breitner, Dr. rer. biol. hum. Kathrin Wolf, Masna Rai BSc, Dr. med. Margit Heier, Prof. Dr. rer. biol. hum. Annette Peters, Dr. rer. biol. hum. Alexandra Schneider

Institut für Medizinische Informationsverarbeitung, Biometrie und Epidemiologie, Ludwig-Maximilians-Universität München: Dr. rer. nat. Susanne Breitner, Prof. Dr. rer. biol. hum. Annette Peters

Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Epidemiologie am UNIKA-T; Selbstständige Forschungsgruppe Klinische Epidemiologie, Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt; MONICA/KORA-Herzinfarktregister, Universitätsklinikum Augsburg: Prof. Dr. med. Christa Meisinger

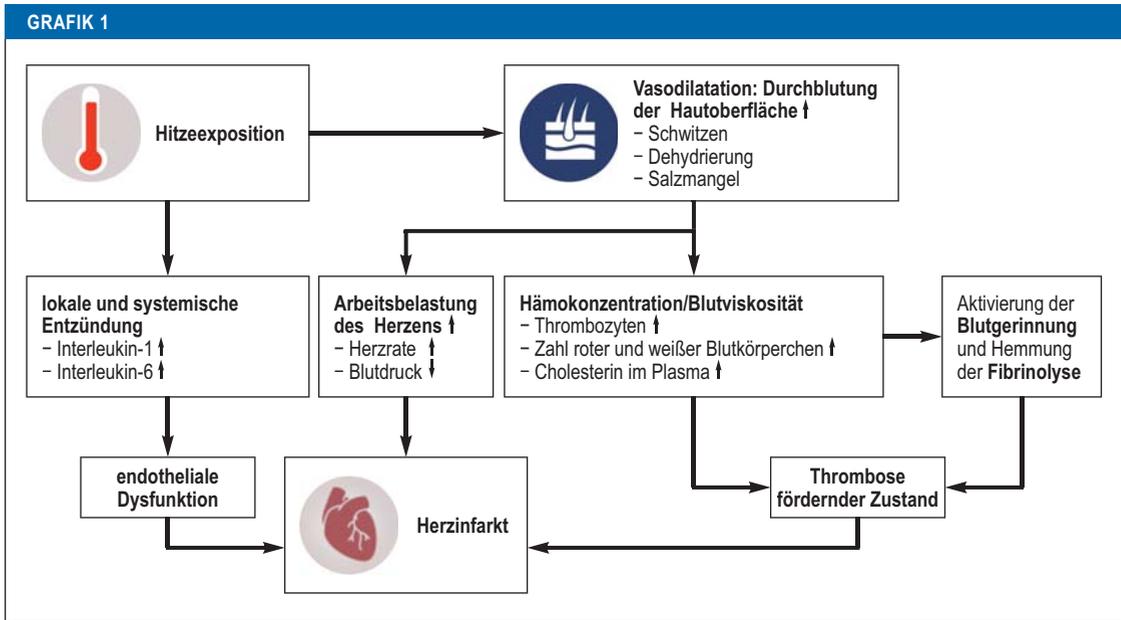
KORA-Studienzentrum, Universitätsklinikum Augsburg: Dr. med. Margit Heier

Abteilung für Innere Medizin I – Kardiologie, Universitätsklinikum Augsburg; Abteilung für Innere Medizin/Kardiologie, Stiftungs Krankenhaus Nördlingen: Prof. Dr. med. Bernhard Kuch

Deutsches Zentrum für Herz-Kreislauf-Forschung (DZHK), Partnereinrichtung München: Prof. Dr. rer. biol. hum. Annette Peters

Die KORA-Forschungsgruppe besteht aus A. Peters (Sprecherin), H. Schulz, L. Schwettmann, R. Leidl, M. Heier, K. Strauch und ihren Mitarbeitern, die für die Gestaltung und die Durchführung der KORA-Studien verantwortlich sind.

Der Klimawandel ist die größte weltweite Bedrohung für die Gesundheit; dieser Bedrohung zu begegnen, könnte die größte globale Herausforderung des 21. Jahrhunderts sein (1). Um die gesundheitlichen Risiken des Klimawandels einzuschränken, wurde im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) im Jahr 2015 das Übereinkommen von Paris verabschiedet. Dessen Ziel ist es, die globale Erwärmung deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten und Anstrengungen dahingehend zu unternehmen, diese auf 1,5 °C zu beschränken (2). Über die unterschiedlichen Auswirkungen der Erwärmungsziele von 1,5 °C beziehungsweise 2 °C auf die Gesundheit ist jedoch wenig bekannt (3, 4). Obwohl sich aus regionalen, nationalen und globalen Studien neue Hinweise ergeben, die eine



Plausible pathophysiologische Mechanismen, die einen Zusammenhang zwischen Hitzebelastung und Herzinfarkten herstellen. Hitzebelastung kann zum Auftreten eines Herzinfarkts führen aufgrund – einer Vasodilatation und einer gesteigerten Blutzirkulation, was zu einer Erhöhung der Arbeitsbelastung des Herzens und zu einer Hämokonzentration und einem Thrombosierisiko führen kann, und – freigesetzter Interleukine, die lokale und systemische Entzündungen hervorrufen und eine endotheliale Dysfunktion zur Folge haben (25, 26). ↑, zunehmend; ↓, abnehmend

mögliche Zunahme der temperaturbedingten Sterblichkeit infolge des Klimawandels aufzeigen (5–9), konzentrierten sich nahezu alle diese Studien auf einen bestimmten zukünftigen Zeitraum und nicht auf ein bestimmtes Ziel, was den Grad der Erwärmung anbelangt (3). Somit ist weiterhin unklar, ob durch eine Eindämmung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C anstatt auf 2 °C temperaturbedingte Gesundheitsauswirkungen vermieden werden können (3, 10).

Im Oktober 2018 legte der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) einen Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C (SR15) vor und schloss mit sehr großer Wahrscheinlichkeit, dass die hitzebedingten Folgen für die Gesundheit bei einer globalen Erwärmung um 2 °C weitreichender ausfallen werden als bei einer Erwärmung um 1,5 °C (11). Da jedoch prognostiziert wird, dass die kältebedingte Sterblichkeit in einigen Regionen aufgrund von wärmeren Wintern sinkt (11), bleibt unklar, inwieweit hitzebedingte Auswirkungen die Abnahme der kältebedingten Auswirkungen ausgleichen können, wodurch die Gesamtauswirkung in Bezug auf die Temperatur ungewiss ist (12). Des Weiteren lag der Schwerpunkt der meisten früheren Projektionsstudien eher auf der Sterblichkeit als auf Erkrankungsraten (13), weshalb nur in beschränktem Maße Hinweise zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die hitzebedingte Morbidität vorliegen. Über Kälte als Auslöser von HI-Fällen wurde bereits berichtet (14). Unsere kürzlich durchgeführte Studie ergab, dass auch Hitze ein möglicher

Auslöser ist (15). Plausible pathophysiologische Mechanismen sind in *Grafik 1* dargestellt. Unsere Zielsetzung hier war nun die Prognose künftiger temperaturbedingter Herzinfarktfälle (HI-Fälle) in Augsburg (Deutschland), ausgehend von einer Erwärmung um Grade, die den Zielen des Übereinkommens von Paris (1,5 °C und 2 °C) und höher (3 °C) entsprechen. Diese Informationen können den Fachkräften im Gesundheitswesen und den politischen Entscheidungsträgern helfen, die mögliche Gesundheitsbedrohung durch den Klimawandel besser zu verstehen.

Methoden
Studienpopulation

Daten des bevölkerungsbasierten HI-Registers der Kooperativen Gesundheitsforschung in der Region Augsburg (KORA) wurden zur Durchführung der Studie herangezogen. Das Untersuchungsgebiet umfasst die Stadt Augsburg und die beiden angrenzenden Landkreise (Augsburg und Aichach-Friedberg). Alle registrierten HI-Fälle und koronaren Todesfälle bei Einwohnern im Alter von 25 bis 74 Jahren (ca. 400 000 Einwohner) vom 1. Januar 2001 bis zum 31. Dezember 2014 gingen in die Analysen ein. Des Weiteren haben wir Subtypen von HI-Fällen einschließlich ST-Hebungsinfarkte (STEMI) und Nicht-ST-Hebungsinfarkte (NSTEMI) analysiert. Einzelheiten zu diesem Register werden im *eMethodenteil* aufgeführt. Die Studie wurde von der Ethik-Kommission der Bayerischen Landesärztekammer genehmigt und in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

Temperaturprojektionen

Tägliche Durchschnittstemperaturen für die Jahre 2010 bis 2099 wurden aus vier globalen Klimamodellen im Rahmen der Phase 2b des „Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project“ (ISIMIP2b) (16) bezogen. Wir haben zwei Klimawandelszenarien im Rahmen der „Representative Concentration Pathways“ (RCP) RCP2.6 und RCP8.5 zugrunde gelegt, die jeweils einem geringen und einem hohen Erwärmungs- und Emissionsszenario entsprechen (*Kasten*). Eine in Ebi et al. (2018) (3) beschriebene Methodik wurde angewandt, um den Zeitraum zu bestimmen, in dem eine Erwärmung um 1,5 °C, 2 °C und 3 °C gegenüber vorindustriellen Werten erreicht werden wird; dabei wurde das Jahrzehnt 2010 bis 2019 als Basis verwendet (*eMethodenteil*).

Untersuchung der gesundheitlichen Folgen

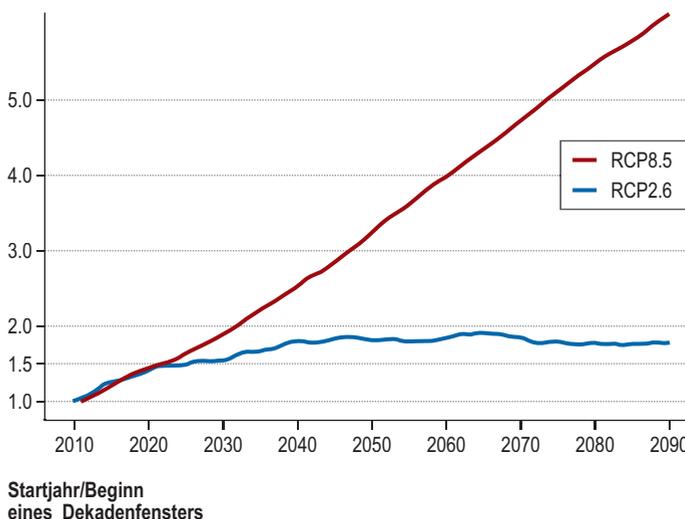
Für unterschiedliche Erwärmungsgrade haben wir basierend auf einem kürzlich entwickelten Ansatz (17) die Anzahl und den Anteil von HI-Fällen geschätzt, die auf Hitze, Kälte und Nettoveränderungen (die summierten Folgen von Hitze und Kälte) zurückzuführen sind. Dabei wurde angenommen, dass es keine künftigen Veränderungen bezüglich Bevölkerungsstruktur und Adaptationsgrad gibt. Die täglichen temperaturbedingten HI-Fälle wurden basierend auf zuvor geschätzten Dosis-Wirkungs-Funktionen zwischen täglichen Durchschnittstemperaturen und täglichen HI-Fällen (*eGrafik*) (15), den Temperaturprojektionen und den Basis-HI-Fällen berechnet. Die Basis-HI-Fälle wurden als die durchschnittlich beobachtete Anzahl von Fällen für jeden Tag des Jahres im Zeitraum 2001–2014 bestimmt. Abschließend haben wir die künftigen Veränderungen als die Differenzen zwischen den zukünftigen Jahrzehnten, in denen die unterschiedlichen Erwärmungsgrade erreicht werden, und dem Basiszeitraum für die beiden RCP-Szenarien berechnet. Mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen wurden empirische Konfidenzintervalle (Empirical Confidence Interval, eCI) geschätzt, die die Unsicherheit der Dosis-Wirkungs-Funktionen und die Variabilität der globalen Klimamodelle berücksichtigen. Wesentliche Elemente der Abschätzung sind im *eKasten* aufgeführt. Einzelheiten zur Abschätzung der gesundheitlichen Folgen sind im *eMethodenteil* zu finden.

Ergebnisse

Grafik 2 zeigt für die zwei RCP-Szenarien die gleitenden Zehn-Jahres-Mittel der globalen mittleren Temperaturprojektionen. Diese wurden gemittelt über vier globale Klimamodelle im Verhältnis zum vorindustriellen Niveau. Die globale Durchschnittstemperatur für das Szenario RCP8.5 liegt im Verhältnis zu den vorindustriellen Werten zum Ende des 21. Jahrhunderts um 3 °C höher, während sie unter RCP2.6 unter 2 °C bleibt. Somit erfüllt das Szenario RCP2.6 das Ziel des Übereinkommens von Paris von 1,5 °C. RCP8.5 haben wir verwendet, um eine Erwärmung auf 2 °C und 3 °C zu untersuchen. Basierend auf diesen Szenarien wird eine

GRAFIK 2

globale Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Niveau (°C)



Zeitreihen des gleitenden Durchschnitts der Veränderung der jährlichen globalen Mitteltemperatur der bodennahen Luft über einen Zeitraum von zehn Jahren im Verhältnis zum vorindustriellen Niveau anhand verschiedener Klimawandel-Szenarien (Representative Concentration Pathway, RCP, siehe *Kasten*). RCP8.5 geht von keinen weiteren Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen aus; RCP2.6 zielt darauf ab, die globale Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen. Die x-Achse kennzeichnet das Startjahr eines gleitenden Fensters von zehn Jahren.

KASTEN

Klimawandel-Szenarien

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) nutzt die Representative Concentration Pathways (RCP), um verschiedene Verläufe von Treibhausgasemissionen und atmosphärischen Konzentrationen, Luftschadstoffemissionen und Landnutzung im 21. Jahrhundert zu beschreiben (27). Die Zahlen (2.6 und 8.5) in den Namen der RCP entsprechen verschiedenen Zielwerten des Strahlungsantriebs im Jahr 2100. Der Strahlungsantrieb spiegelt die Auswirkung von Treibhausgasen und Aerosolen auf die Energiebilanz der Erde wider. In dieser Studie wurden zwei RCP verwendet – ein strenges Emissionsreduktions-szenario (RCP2.6) und ein Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (RCP8.5).

- RCP2.6 zielt darauf ab, die globale Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, und erfordert erhebliche negative Nettoemissionen bis 2100, mit CO₂-Emissionen von durchschnittlich ca. 2 Gt/Jahr (28).
- RCP8.5 geht von keinen weiteren Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen aus (sogenanntes „business as usual“-Szenario), mit durchschnittlichen CO₂-Emissionen von 73 Gt/Jahr im Verlauf des 21. Jahrhunderts (29).

Gegenüber den Jahren 1986 bis 2005 dürfte der globale mittlere Meeresspiegelanstieg in den Jahren 2081 bis 2100 unter RCP2.6 vermutlich bei 0,40 m und unter RCP8.5 vermutlich bei 0,63 m liegen.

TABELLE 1

Beschreibung von Szenarien der globalen Erwärmung um 1,5 °C, 2 °C und 3 °C

RCP	Jahrzehnt	globale Erwärmung
RCP2.6	2031 ± 5 Jahre	1,5 °C
RCP8.5	2037 ± 5 Jahre	2 °C
RCP8.5	2052 ± 5 Jahre	3 °C

RCP, Representative Concentration Pathway – Treibhausgaskonzentrationskurve, die die Auswirkung von Treibhausgasen und Aerosolen auf die Energiebilanz der Erde widerspiegelt. Ziel von RCP2.6 ist es, die globale Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, bei RCP8.5 wird davon ausgegangen, dass es keine weiteren Eindämmungsmaßnahmen in Bezug auf die Reduzierung von Emissionen gibt („business as usual“-Szenario).

TABELLE 2

Änderungen in Bezug auf die zuschreibbare Zahl und den zuschreibbaren Anteil [95%-eKI]* temperaturbedingter Herzinfarkte pro Jahrzehnt in Augsburg, bei einer globalen Erwärmung um 1,5 °C, 2 °C und 3 °C

globale Erwärmung	zuschreibbare Anzahl			zuschreibbarer Anteil (%)		
	Hitze	Kälte	Nettoveränderung	Hitze	Kälte	Nettoveränderung
1,5 °C	17 [-1; 46]	-24 [-87; 32]	-6 [-60; 50]	0,2 [0; 0,5]	-0,2 [-0,9; 0,3]	-0,1 [-0,6; 0,5]
2 °C	54 [1; 124]	-36 [-101; 43]	18 [-64; 117]	0,6 [0; 1,3]	-0,4 [-1,0; 0,4]	0,2 [-0,7; 1,2]
3 °C	109 [4; 313]	-46 [-142; 56]	63 [-83; 257]	1,1 [0; 3,2]	-0,5 [-1,5; 0,6]	0,7 [-0,9; 2,7]

* Das empirische Konfidenzintervall (95%-eKI) wurde durch Einbeziehung der Unsicherheit der Dosis-Wirkungs-Funktionen unter Nutzung von 5 000 Monte-Carlo-Simulationen und vier globalen Klimamodellen erzielt.

Eine globale Erwärmung um 2 °C wird mit 54 zusätzlichen hitzebedingten Fällen und 36 weniger kältebedingten Fällen in Verbindung gebracht, was zu einer Nettoveränderung von 18 zusätzlichen temperaturbedingten Fällen pro Jahrzehnt führt. Somit können 0,2 % aller Herzinfarkte auf die globale Erwärmung zurückgeführt werden.

Erwärmung um 1,5 °C um das Jahr 2031 herum erreicht (Tabelle 1). Eine Erwärmung um 2 °C beziehungsweise um 3 °C wird um das Jahr 2037 beziehungsweise um das Jahr 2052 erreicht.

Von 2001 bis 2014 gab es in der Region Augsburg durchschnittlich 967 koronare Ereignisse pro Jahr, darunter waren 235 STEMI-Fälle und 331 NSTEMI-Fälle. Im Verhältnis zum Basiszeitraum werden hitzebedingte HI-Fälle in allen Erwärmungsszenarien zunehmen, während kältebedingte HI-Fälle abnehmen werden (Tabelle 2). Wird das Ziel des Übereinkommens von Paris – nämlich die Eindämmung der Erwärmung auf 1,5 °C – erreicht, werden die gesamten temperaturbedingten HI-Fälle in Augsburg pro Jahrzehnt leicht abnehmen (-6; 95%-Konfidenzintervall: [-60; 50]). Eine Erwärmung um 2 °C führt zu einer stärkeren Zunahme von hitzebedingten HI-Fällen als Abnahme von kältebedingten HI-Fällen, was zu einem Nettoanstieg um 18 [-64; 117] HI-Fälle pro Jahrzehnt führt. Bei einer jenseits des Ziels des Übereinkommens von Paris liegenden Erwärmung um 3 °C nehmen temperaturbedingte HI-Fälle um 63 [-83; 257] pro Jahrzehnt zu, was einem Anstieg von circa 0,7 % der Belastung durch HI-Fälle entspricht.

Grafik 3 fasst die Nettoveränderungen bei den temperaturbedingten Herzinfarkten für die verschiedenen Erwärmungsszenarien für die Gesamtzahl der Herzinfarkte sowie die Subtypen zusammen. Während die Ge-

samtzahlen und die NSTEMI-Fälle bei höheren Erwärmungsgraden zunehmen, werden hingegen STEMI-Fälle insgesamt abnehmen, da hier die Zahl der kältebedingten HI-Fälle stärker zurückgeht als die Zahl der durch Temperaturerhöhung zusätzlich bewirkten HI-Fälle. Die meisten der zusätzlichen temperaturbedingten HI-Fälle werden NSTEMI-Fälle sein, wobei sich die Zunahme im Bereich von 21 ([-13; 63], bei einer Erwärmung um 1,5 °C) bis zu 102 ([21; 201], bei einer Erwärmung um 3 °C) zusätzlichen HI-Fällen bewegt.

Diskussion

Unsere Prognosen zeigen, dass die untersuchten Anstiege in der globalen Erwärmung voraussichtlich zu einer Zunahme der hitzebedingten HI-Fälle und zu einer Abnahme der kältebedingten HI-Fälle in Augsburg (Deutschland) führen werden. Kann die Erwärmung bei 1,5 °C aufgehalten werden, so wird eine erhebliche Anzahl temperaturbedingter HI-Fälle vermieden. Bei einem RCP2.6-Szenario mit geringer Emission wird die Erwärmung bis 2100 auf unter 2 °C begrenzt, was zu einer geringfügigen Nettoveränderung der HI-Fällen führt. Im hohen Emissions-Szenario RCP8.5 wird die Erwärmung bis 2100 dagegen mehr als 3 °C betragen, was zu einer erheblich erhöhten Belastung durch HI-Fälle führen wird.

Nur sehr wenige Studien haben bisher die regionalen gesundheitlichen Folgen einer Stabilisierung der Kli-

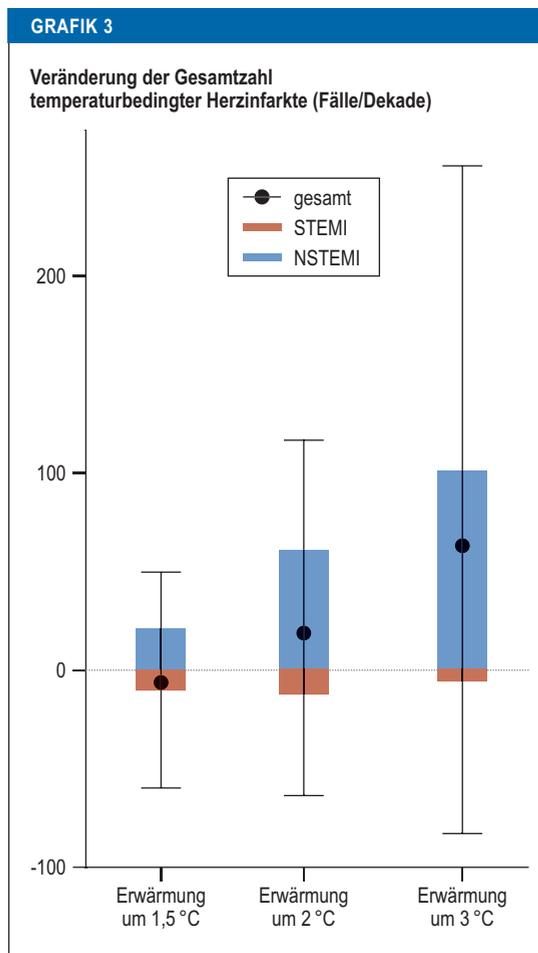
maerwärmung auf 1,5 °C anstatt auf 2 °C (3) direkt abgeschätzt. Unsere Erkenntnisse in Bezug auf zunehmende hitzebedingte Folgen bei einer Erwärmung um 2 °C anstatt um 1,5 °C stimmen mit der Schlussfolgerung des Sonderberichts 15 des IPCC (11) und den Ergebnissen aus zwei aktuellen multizentrischen europäischen Studien (10, 12) überein. Des Weiteren konnten wir unter dem Hoch-Emissions-Szenario RCP8.5 eine große Reduktion der hitzebedingten HI-Fälle in Augsburg feststellen, wenn die Erwärmung auf 2 °C anstelle von 3 °C gehalten werden kann. Was die Nettoveränderung betrifft, so wurde in einer aktuellen weltweiten Studie zudem ein Nettoanstieg der temperaturbedingten Sterblichkeit in mittel- und südeuropäischen Städten festgestellt (12). Dies legt nahe, dass durch Emissionsreduktionen in Richtung der Ziele des Übereinkommens von Paris hitzebedingte Auswirkungen auf die HI-Krankheitslast vermieden werden können.

In Bezug auf die Klimaszenarien erfüllt RCP2.6 das Ziel des Übereinkommens von Paris, die Erwärmung deutlich unter 2 °C zu halten (Grafik 2, Tabelle 1). Dies bestätigt auch eine vorausgegangene Untersuchung (3) und führt bei einer Erwärmung um 1,5 °C zu einer nur unwesentlichen Veränderung (-0,1 %) der Belastung durch HI-Fälle. Dagegen werden temperaturbedingte HI-Fälle unter dem RCP8.5-Szenario und bei einer Erwärmung um 2 °C um 0,2 % und bei einer Erwärmung um 3 °C um 0,7 % zunehmen (Tabelle 2). Ebenso wurde auch im Rahmen einer früheren Studie geschätzt, dass die temperaturbedingte Sterblichkeit in mittel- und südeuropäischen Städten im Verlauf des 21. Jahrhunderts unter dem RCP2.6-Szenario wesentlich geringer ausfallen wird als unter RCP8.5 (5).

Nach Angaben des Statistischen Bundesamts traten im Jahr 2015 in Deutschland 135 218 Herzinfarkt-Ereignisse bei Personen im Alter von 25–74 Jahren auf (darunter sowohl akute HI-Fälle als auch Todesfälle aufgrund von Herzstillstand) (18). Eine grobe Überschlagsrechnung der von uns prognostizierten Veränderungen in der Region Augsburg auf ganz Deutschland zeigt, dass durch eine Eindämmung der Erwärmung auf 1,5 °C im Vergleich zu einer Erwärmung auf 3 °C 1 082 HI-Fälle pro Jahr verhindert werden könnten. Diese Zahl ist vermutlich zu niedrig angesetzt, da wir nur Patienten unter 75 Jahren berücksichtigt haben, ältere Menschen aber anfälliger für eine hitzebedingte Sterblichkeit und Morbidität sind (19, 20). Unsere Erkenntnisse legen nahe, dass eine ehrgeizige Reduzierung von Treibhausgasemissionen nötig ist, um die Ziele des Übereinkommens von Paris zu erreichen und nachteilige temperaturbedingte gesundheitliche Folgen zu vermeiden.

Implikationen für Fachkräfte im Gesundheitswesen

Fachkräfte im Gesundheitswesen haben eine wichtige Funktion bei der Durchsetzung rascherer Fortschritte bei der Bekämpfung des Klimawandels, da sie darin ausgebildet sind, Patienten über Gesundheitsgefahren aufzuklären. Zudem wird ihnen möglicherweise mehr



Änderungen der temperaturbedingten Herzinfarkte pro Jahrzehnt für prognostizierte Erwärmungen um 1,5 °C, 2 °C und 3 °C. Rote und blaue Balken zeigen die Veränderungen bei der temperaturbedingten Zahl von ST-Hebungsinfarkten (STEMI) und Nicht-ST-Hebungsinfarkten (NSTEMI) in künftigen wärmeren Jahrzehnten im Verhältnis zu den Jahren 2010–2019. Schwarze Punkte und vertikale Linien kennzeichnen Veränderungen und empirische Konfidenzintervalle (95 %) in der Gesamtzahl temperaturbedingter Herzinfarkte.

Vertrauen entgegengebracht als Umweltschützern; sie können die Gesundheitsrisiken, die durch den Klimawandel entstehen, besser kommunizieren und dementsprechend möglicherweise auch die Politik überzeugen, dass Treibhausgasemissionen reduziert werden müssen (1, 21). Mit der Fähigkeit, sich effektiv gegen die Gesundheitsgefahren des Klimawandels einzusetzen, sollten Fachkräfte im Gesundheitswesen eine führende Rolle bei der Bekämpfung des Klimawandels spielen (22). Um Allgemeinmediziner und anderes Fachpersonal im Gesundheitswesen zu ermutigen, eine Vorreiterrolle bei der Bekämpfung des Klimawandels einzunehmen, ist es wichtig zu verstehen, welche Folgen der Klimawandel auf die Gesundheit hat (23). Diese Studie legt nahe, dass eine globale Erwärmung um mehr als 1,5 °C zu einer Zunahme temperaturbedingter HI-Fälle führt, und appelliert an die Fachkräfte im Gesundheitswesen, die Öffentlichkeit und politische Entschei-

Kernaussagen

- Jeder Anstieg in der globalen Erwärmung führt zu einer Zunahme hitzebedingter Herzinfarkte und zu einer Abnahme kältebedingter Herzinfarkte.
- In einem emissionsarmen Szenario mit einer Eindämmung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C ist eine weitgehend unveränderte Zahl von temperaturbedingten Herzinfarkten zu erwarten.
- In einem Szenario mit hohen Emissionen („business as usual“) wird die Zahl der temperaturbedingten Herzinfarkte zunehmen, wenn die globale Erwärmung 2 °C beziehungsweise 3 °C erreicht.
- Wird das Ziel des Übereinkommens von Paris von 1,5 °C nicht erreicht, wird das zu einer wesentlichen Zunahme temperaturbedingter Herzinfarkte führen, insbesondere bei den Nicht-ST-Hebungsinfarkten.

dungsträger über die potenziellen gesundheitlichen Risiken des Klimawandels und die Vorteile von Klimaschutzmaßnahmen zu informieren.

Stärken und Limitationen der Studie

Unserer Kenntnis nach ist dies die erste Studie, die hitzebedingte HI-Fälle im Zusammenhang mit den Zielen des Übereinkommens von Paris prognostiziert. Unsere Schätzungen basieren auf einer geprüften, vollständigen und detaillierten Registrierung sämtlicher Herzinfarkte und koronarer Todesfälle in Augsburg in Kombination mit einem fortgeschrittenen und etablierten Ansatz zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in Dosis-Wirkungs-Funktionen und Variabilität von Klimamodellen (5). Unsere Schätzungen können als Veränderungen der hitzebedingten HI-Fälle interpretiert werden, wenn die derzeitige Bevölkerung in Augsburg künftigen Temperaturen bei einer globalen Erwärmung um 1,5 °C, 2 °C und 3 °C ausgesetzt wäre. Unsere Projektionen erlauben somit eine Isolierung der Auswirkungen des Klimawandels von anderen Faktoren wie demografischem Wandel und Adaption der Bevölkerung (5).

Wie jede Studie, weist auch diese Studie Limitationen auf. Zunächst liegt der Schwerpunkt unserer Projektionen der gesundheitlichen Folgen auf bestimmten Zielen des Übereinkommens von Paris und weniger auf einheitlichen künftigen Zeiträumen. In diesem Ansatz wurden verschiedene Zeiträume für verschiedene Reduktionsziele angewandt, was unsere Möglichkeit einschränkt, Auswirkungen künftiger demografischer Veränderungen, wie Populationsgröße, Altersstruktur, Lebensweise und zugrunde liegende HI-Raten, zu berücksichtigen. Da wir in Zukunft in Augsburg mehr NSTEMI- und weniger STEMI-Fälle erwarten (15), werden die künftigen Veränderungen der gesamten temperaturbedingten HI-Fälle möglicherweise unterschätzt. Des Weiteren weisen die von uns verwendeten

Temperaturprojektionen eine relativ grobe räumliche Auflösung (~ 50 km) auf. Zukünftige Studien mit höher aufgelösten Temperaturprojektionen, wie beispielsweise die vom Deutschen Wetterdienst entwickelten Temperaturprojektionen von COSMO-CLM, sind nötig, um regionale gesundheitliche Folgen des Klimawandels abschätzen zu können. Zudem haben wir die Anpassung der Bevölkerung an die Hitze nicht berücksichtigt (24). Allerdings könnte eine hitzebedingte Anfälligkeit in Augsburg auch weiter zunehmen (15) und künftig zu erhöhten temperaturbedingten Auswirkungen führen.

Fazit

Temperaturbedingte HI-Fälle in Augsburg werden mit dem Anstieg der globalen Erwärmung von 1,5 °C auf 2 °C bzw. 3 °C zunehmen. Im Vergleich zu einem „Weiter-wie-bisher“-Szenario (mit hohen Emissionen und Untätigkeit in Bezug auf den Klimawandel) werden durch die Eindämmung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C in einem emissionsarmen Szenario zusätzliche HI-Fälle vermieden, was nahelegt, dass Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels erforderlich sind, um das Ziel des Übereinkommens von Paris von 1,5 °C zu erreichen.

Förderung

Kai Chen PhD bedankt sich für die Unterstützung durch das Humboldt-Forschungsstipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung. Die KORA-Forschungsplattform wurde vom Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH) initiiert und finanziert. Das Helmholtz Zentrum München wiederum wird vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie und vom Freistaat Bayern gefördert. Seit dem Jahr 2000 wird die Datenerhebung der HI-Fälle vom Bundesministerium für Gesundheit und Soziale Sicherheit mitfinanziert, mit dem Ziel, die wichtigsten Forschungsergebnisse im Rahmen der Bundesgesundheits-Berichterstattung (www.gbe-bund.de) zu veröffentlichen.

Interessenkonflikt

Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Manuskriptdaten

eingereicht: 5. 3. 2019, revidierte Fassung angenommen: 17. 6. 2019

Literatur

1. Watts N, Adger WN, Agnolucci P, et al.: Health and climate change: policy responses to protect public health. *Lancet* 2015; 386: 1861–914.
2. UNFCCC: Adoption of the Paris Agreement. Report No FCCC/CP/2015/L9/Rev12015.
3. Ebi KL, Hasegawa T, Hayes K, Monaghan A, Paz S, Berry P: Health risks of warming of 1.5 °C, 2 °C, and higher, above pre-industrial temperatures. *Environ Res Lett* 2018; 13: 063007.
4. Shindell D, Faluvegi G, Seltzer K, Shindell C: Quantified, localized health benefits of accelerated carbon dioxide emissions reductions. *Nat Clim Chang* 2018; 8: 291–5.
5. Gasparini A, Guo Y, Sera F, et al.: Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet Health* 2017; 1: e360-7.
6. Weinberger KR, Haykin L, Eliot MN, Schwartz JD, Gasparini A, Wellenius GA: Projected temperature-related deaths in ten large U.S. metropolitan areas under different climate change scenarios. *Environ Int* 2017; 107: 196–204.
7. Chen K, Horton RM, Bader DA, et al.: Impact of climate change on heat-related mortality in Jiangsu Province, China. *Environ Pollut* 2017; 224: 317–25.
8. Guo Y, Gasparini A, Li S, et al.: Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: a multicountry time series modelling study. *PLoS Med* 2018; 15: e1002629.
9. Li T, Horton RM, Kinney PL: Projections of seasonal patterns in temperature-related deaths for Manhattan, New York. *Nat Clim Chang* 2013; 3: 717.

10. Mitchell D, Heaviside C, Schaller N, et al.: Extreme heat-related mortality avoided under Paris Agreement goals. *Nat Clim Chang* 2018; 8: 551–3.
11. Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, et al.: Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörrner H-O, et al., (eds.): *Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018.
12. Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Sera F, et al.: Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios. *Clim Change* 2018; 150: 391–402.
13. Weinberger KR, Kirwa K, Eliot MN, Gold J, Suh HH, Wellenius GA: Projected changes in temperature-related morbidity and mortality in Southern New England. *Epidemiology* 2018; 29: 473–81.
14. Claeys MJ, Rajagopalan S, Nawrot TS, Brook RD: Climate and environmental triggers of acute myocardial infarction. *Eur Heart J* 2017; 38: 955–60.
15. Chen K, Breitner S, Wolf K, et al.: Temporal variations in the triggering of myocardial infarction by air temperature in Augsburg, Germany, 1987–2014. *Eur Heart J* 2019; 40: 1600–8.
16. Frieler K, Lange S, Piontek F, et al.: Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geosci Model Dev* 2017; 10: 4321–45.
17. Gasparrini A, Leone M: Attributable risk from distributed lag models. *BMC Med Res Methodol* 2014; 14: 55.
18. German Federal Statistical Office: Diagnoses of hospital patients. www-genesis.destatis.de/genesis/online/data (last accessed on 7 January 2019).
19. Basu R: High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environ Health* 2009; 8: 40.
20. Bell ML, O'Neill MS, Ranjit N, Borja-Aburto VH, Cifuentes LA, Gouveia NC: Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *Int J Epidemiol* 2008; 37: 796–804.
21. McCoy D, Hoskins B: The science of anthropogenic climate change: what every doctor should know. *BMJ* 2014; 349: g5178.
22. Ramanathan V, Haines A: Healthcare professionals must lead on climate change. *BMJ* 2016; 355: i5245.
23. Patz JA, Frumkin H, Holloway T, Vimont DJ, Haines A: Climate change: challenges and opportunities for global health. *JAMA* 2014; 312: 1565–80.
24. Petkova EP, Vink JK, Horton RM, et al.: Towards more comprehensive projections of urban heat-related mortality: estimates for New York City under multiple population, adaptation, and climate scenarios. *Environ Health Perspect* 2017; 125: 47–55.
25. Schneider A, Ruckerl R, Breitner S, Wolf K, Peters A: Thermal control, weather, and aging. *Curr Environ Health Rep* 2017; 4: 21–9.
26. Liu L, Breitner S, Pan X, et al.: Associations between air temperature and cardio-respiratory mortality in the urban area of Beijing, China: a time-series analysis. *Environ Health* 2011; 10: 51.
27. IPCC: *Climate Change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva, Switzerland: IPCC; 2014.
28. van Vuuren DP, Stehfest E, den Elzen MGJ, et al.: RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C. *Clim Change* 2011; 109: 95–116.
29. Riahi K, Rao S, Krey V, et al.: RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Clim Change* 2011; 109: 33–57.
30. Löwel H, Meisinger C, Heier M, Hörmann A: The population-based acute myocardial infarction (AMI) registry of the MONICA/KORA study region of Augsburg. *Das Gesundheitswesen* 2005; 67: 31–7.
31. Kuch B, Heier M, Von Scheidt W, Kling B, Hoermann A, Meisinger C: 20-year trends in clinical characteristics, therapy and short-term prognosis in acute myocardial infarction according to presenting electrocardiogram: the MONICA/KORA AMI Registry (1985–2004). *J Intern Med* 2008; 264: 254–64.
32. Frieler K, Lange S, Piontek F, et al.: Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geosci Model Dev* 2017; 10: 4321–45.
33. Lange S: Bias correction of surface downwelling longwave and short-wave radiation for the EWEMBI dataset. *Earth Syst Dynam* 2018; 9: 627–45.

Anschrift für die Verfasser

Kai Chen PhD
 Helmholtz Zentrum München
 Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt
 Institut für Epidemiologie
 Ingolstädter Landstraße 1, Neuherberg
 85764 München
kai.chen@helmholtz-muenchen.de

Zitierweise

Chen K, Breitner S, Wolf K, Rai M, Meisinger C, Heier M, Kuch B, Peters A, Schneider A, on behalf of the KORA Study Group: Projection of temperature-related myocardial infarction in Augsburg, Germany: moving on from the Paris Agreement on Climate Change. *Dtsch Arztebl Int* 2019; 116: 521–7. DOI: 10.3238/arztebl.2019.0521

► Die englische Version des Artikels ist online abrufbar unter: www.aerzteblatt-international.de

Zusatzmaterial
 eGrafik, eKasten, eMethodenteil:
www.aerzteblatt.de/19m0521 oder über QR-Code



Hinweise für Autoren von Diskussionsbeiträgen im Deutschen Ärzteblatt

- Reichen Sie uns bitte Ihren Diskussionsbeitrag bis spätestens vier Wochen nach Erscheinen des Primärartikels ein.
- Argumentieren Sie wissenschaftlich, sachlich und konstruktiv. Briefe mit persönlichen Angriffen können wir nicht abdrucken.
- Schreiben Sie klar und deutlich, fokussieren Sie sich inhaltlich. Vermeiden Sie es, Nebenaspekte zu berühren.
- Sichern Sie die wichtigsten Behauptungen durch Referenzen ab. Bitte geben Sie aber – abgesehen von dem Artikel, auf den Sie sich beziehen – insgesamt nicht mehr als drei Referenzen an.
- Beschränken Sie Ihren Diskussionsbeitrag auf eine Textlänge von 250 Wörtern (ohne Referenzen und Autorenadresse).
- Verzichten Sie auf Tabellen, Grafiken und Abbildungen. Aus Platzgründen können wir solche grafischen Elemente in Diskussionsbeiträgen nicht abdrucken.
- Füllen Sie eine Erklärung zu einem möglichen Interessenkonflikt aus.
- Bearbeiten Sie die deutschen und englischen Satzzeichen nach Erhalt ohne Verzögerung.
- Geben Sie eine Adresse an. Anonyme Diskussionsbeiträge können wir nicht publizieren.
- Senden Sie Ihren Diskussionsbeitrag zu Artikeln der Medizinisch-Wissenschaftlichen Redaktion an: medwiss@aerzteblatt.de oder Deutsches Ärzteblatt, Dieselstraße 2, 50859 Köln.

Zusatzmaterial zu:

Zukünftige Häufigkeit temperaturbedingter Herzinfarkte in der Region Augsburg

Eine Hochrechnung auf der Grundlage der Zielwerte der Pariser UN-Klimakonferenz

Kai Chen, Susanne Breitner, Kathrin Wolf, Masna Rai, Christa Meisinger, Margit Heier, Bernhard Kuch, Annette Peters und Alexandra Schneider für die KORA-Forschungsgruppe

Dtsch Arztebl Int 2019; 116: 521–7. DOI: 10.3238/arztebl.2019.0521

eMETHODENTEIL

Studienpopulation

Daten des bevölkerungsbasierten Herzinfarktregisters (HI-Register) der Kooperativen Gesundheitsforschung in der Region Augsburg (KORA) wurden herangezogen. Zur Region Augsburg gehören die Stadt Augsburg (mit einem Gebiet von 147 km²) und die beiden angrenzenden Landkreise Augsburg und Aichach-Friedberg (1 854 km²). Das MONICA/KORA-Herzinfarktregister wurde 1984 im Rahmen des WHO MONICA-Projekts (Monitoring Trends and Determinants in Cardiovascular Disease) eingerichtet und wird seit 1996 im Rahmen des KORA-Forschungsprogramms fortgeführt. Seit 1984 werden im MONICA/KORA-Herzinfarktregister sämtliche HI-Fälle bei 25- bis 74-jährigen Personen erfasst, die ihren ersten Wohnsitz in der Studienregion haben (circa 400 000 Einwohner) und in eines der acht beteiligten Krankenhäuser eingewiesen werden. Zusätzlich werden alle tödlichen Herzinfarkte inklusive der plötzlichen Herztodesfälle erfasst. Entsprechend dem MONICA-Protokoll werden HI-Patienten, die mindestens 24 Stunden nach Aufnahme in ein Krankenhaus überlebt haben, zu dem Vorfall, zu demografischen Angaben, zu Komorbiditäten, zur Medikation und zur Familiengeschichte befragt. Überlebt ein Patient den 28. Tag nach der Aufnahme in ein Krankenhaus, wird der HI als nichttödlich, andernfalls als tödlich eingestuft. Koronare Todesfälle sind tödliche Fälle außerhalb des Krankenhauses oder innerhalb von 24 Stunden nach Aufnahme in ein Krankenhaus. Alle tödlichen Herzinfarkte (ICD-9-Codes: 410–414) wurden durch Überprüfung sämtlicher Todesbescheinigungen durch die regionalen Gesundheitsämter und anhand der Daten des zuletzt behandelnden Arztes und/oder Gerichtsmediziners ermittelt.

In dieser Studie wurden alle registrierten HI-Fälle und koronaren Todesfälle im Zeitraum vom 1. Januar 2001 bis zum 31. Dezember 2014 bei Einwohnern im Alter von 25 bis 74 Jahren untersucht. Des Weiteren haben wir Subtypen von HI-Fällen einschließlich ST-Hebungsinfarkte (STEMI) und Nicht-ST-Hebungsinfarkte (NSTEMI) analysiert. Aufgrund der kleinen Stichprobengröße (38,6 Fälle/Jahr) wurde der Schenkelblock

nicht in diese Analyse miteinbezogen. Weitere Einzelheiten zu diesem Register sind an anderer Stelle zu finden (30, 31).

Dosis-Wirkungs-Funktionen und Basis-HI-Fälle

Dosis-Wirkungs-Funktionen („exposure-response functions, ERF) zwischen täglichen Durchschnittstemperaturen und täglichen HI-Fällen wurden aus unserer früheren Arbeit für den Zeitraum 2001 bis 2014 verwendet (15). Dort haben wir eine nach Zeiten geschichtete Case-Crossover-Studie durchgeführt und ein nichtlineares „Distributed Lag“-Modell mit maximal verzögerten Effekten von zehn Tagen („lag days“) genutzt, um die Dosis-Wirkungs-Funktionen zu schätzen. Temperatur und HI-Fälle zeigten im Allgemeinen U-förmige Zusammenhänge mit signifikant zunehmenden Risiken bei Hitze (Temperaturen über der minimalen HI-Temperatur [MHIT, als Referenztemperatur, 18,4 °C]) und einem nicht signifikant zunehmenden Risiko bei Kälte (Temperaturen unter der MHIT) (*eGrafik*). Die Basis-HI-Fälle wurden als die durchschnittlich beobachtete Anzahl von Fällen für jeden Tag des Jahres im Zeitraum 2001–2014 berechnet.

Temperaturprojektionen

Tägliche Durchschnittstemperaturen für die Jahre 2010 bis 2099 wurden aus Phase 2b des Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) (32) bezogen. Es wurden zwei Klimawandelszenarien im Rahmen der „Representative Concentration Pathways“ (RCP) RCP2.6 und RCP8.5 zugrunde gelegt, die jeweils einem geringen und einem hohen Erwärmungs- und Emissionsszenario entsprachen. Tägliche, simulierte Durchschnittstemperaturen mit einer räumlichen Auflösung von 0,5° × 0,5° wurden aus allen vier in ISIMIP2b enthaltenen globalen Klimamodellen (GKM) (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR und MIROC5) erzeugt. Diese Temperatursimulationen wurden basierend auf dem EWEMBI-Datensatz einer Bias-Korrektur unterzogen (33). Wie in früheren Studien (5, 13) haben wir Tagestemperaturen in den Basis- und zukünftigen Zeiträumen erhalten, in-

dem wir die Temperaturprojektionen in einer Gitterzelle, die das geografische Zentrum des Gebiets Augsburg abdeckt, extrahiert haben.

Um den Zeitraum zu bestimmen, in dem eine Erwärmung um 1,5 °C, 2 °C und 3 °C gegenüber vorindustriellen Werten erreicht werden wird, wurde eine in Ebi et al. (2018) (3) beschriebene Methode angewandt, die den IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C stützt. Zunächst wurde das Jahrzehnt 2010–2019 als Basiszeitraum definiert, da dessen zentrales Jahr 2015 jenes Jahr ist, in dem erstmals eine Erwärmung um 1 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau (definiert als Durchschnitt der Jahre 1850 bis 1900) (3) erreicht wurde. Dann haben wir eine Reihe von gleitenden 10-Jahres-Projektionsfenstern erstellt, beginnend mit dem Zeitraum 2011–2020 und mit 1-Jahresstufen. So wurden für jeden RCP Dekadenfenster ausgewählt, in denen der GKM-Ensemble-Mittelwert der globalen, bodennahen Durchschnittstemperatur 0,5 °C, 1 °C und 2 °C über dem Ausgangswert der Jahre 2010 bis 2019 lag.

Untersuchung der gesundheitlichen Folgen

Für unterschiedliche Erwärmungsgrade haben wir basierend auf einem kürzlich entwickelten Ansatz (17) die Anzahl und den Anteil von HI-Fällen geschätzt, die auf Hitze, Kälte und Nettoveränderungen (die summierten Folgen von Hitze und Kälte) zurückzuführen sind. Dabei wurde angenommen, dass es keine künftigen Veränderungen bezüglich Bevölkerungsstruktur und Adaptationsgrad gibt. Zusammengefasst wurden zuvor geschätzte Dosis-Wirkungs-Funktionen (15) und die modellierten täglichen Reihen von Temperatur und HI-Fällen genutzt, um tägliche, temperaturebedingte HI-Fälle zu berechnen. Anschließend wurde die insgesamt zuschreibbare Anzahl berechnet, indem wir die temperaturbedingten Fälle an allen Tagen der Reihe

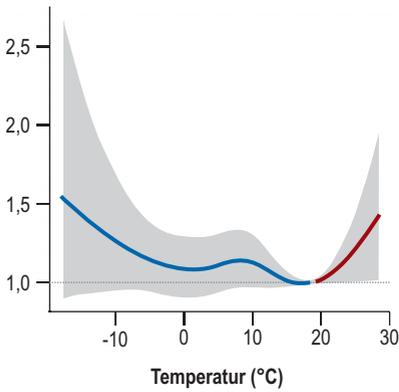
aufaddiert haben; der zuschreibbare Anteil wurde als das Verhältnis der gesamten zuschreibbaren Anzahl zur gesamten Anzahl von HI-Fällen berechnet. Schließlich haben wir die künftigen Veränderungen als die Differenzen zwischen den zukünftigen Jahrzehnten, in denen die unterschiedlichen Erwärmungsgrade erreicht werden, und dem Basiszeitraum für jedes GKM und jeden RCP berechnet.

Der GKM-Ensemble-Mittelwert der insgesamt zuschreibbaren Anzahl und der gesamten zuschreibbaren Anteile von HI-Fällen wurde durch Kombinationen von RCP und künftigen Zeiträumen entsprechend den Erwärmungen von 1,5 °C, 2 °C und 3 °C berechnet. Mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen wurden empirische Konfidenzintervalle (Empirical Confidence Intervals, eCI) geschätzt, die die Unsicherheit der Dosis-Wirkungs-Funktionen und die Variabilität der globalen Klimamodelle berücksichtigen. eCIs wurden aus der empirischen Verteilung von 5 000 Stichproben von zufälligen Parametersätzen bestimmt, die die Dosis-Wirkungs-Funktionen aus dem nichtlinearen „Distributed Lag“-Modell und die vier globalen Klimamodelle beschreiben, näher erläutert an anderer Stelle (5, 17). Zusammengefasst haben wir die Unsicherheit der Dosis-Wirkungs-Funktionen quantifiziert, indem wir mittels Monte-Carlo-Simulationen 5 000 Stichproben für die geschätzten Koeffizienten aus dem nichtlinearen „Distributed Lag“-Modell generiert haben, mit dem die Dosis-Wirkungs-Funktionen geschätzt wurden. Anschließend haben wir Ergebnisse für jedes der vier globalen Klimamodelle erzielt. Daraus ergab sich das 95%-eKI, definiert als die 2,5.–97,5. Perzentilen der empirischen Verteilung aus den Stichproben der ERF-Koeffizienten und globalen Klimamodellen. Somit berücksichtigt das 95%-eKI die Unsicherheit sowohl in Bezug auf die Dosis-Wirkungs-Funktionen als auch in Bezug auf die globalen Klimamodelle.

eGRAFIK

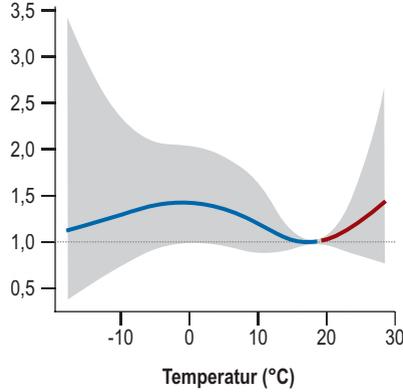
Herzinfarkte insgesamt

relatives Risiko



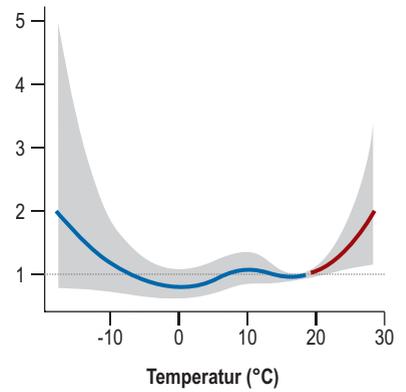
ST-Hebungsinfarkt

relatives Risiko



Nicht-ST-Hebungsinfarkt

relatives Risiko



Kumulative Dosis-Wirkungs-Funktionen zwischen Lufttemperatur und Herzinfarkten mit 95%-Konfidenzintervallen in Augsburg, Deutschland, im Zeitraum 2001–2014. Die Dosis-Wirkungs-Funktionen stammen aus Chen et al. (2019) (15). Die roten Linien zeigen die Hitzeauswirkung (Temperatur über 18,4 °C), wohingegen die blauen Linien die Auswirkung von Kälte zeigen (Temperatur unter 18,4 °C).

eKASTEN

Wesentliche Elemente in Bezug auf die Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels

- Die Dosis-Wirkungs-Funktionen stammen aus einer früheren Studie (15).
- Wir gehen von einer konstanten Population aus (Populationsgröße, Altersstruktur und Lebensweise).
- Wir gehen von einer konstanten Inzidenz der Gesamtzahl und der Subtypen von Herzinfarkten aus.
- Die Temperaturprojektionen für die Region Augsburg stammen aus vier globalen Klimamodellen basierend auf zwei verschiedenen Klimawandelszenarien.
- Zu möglichen Unsicherheiten in Bezug auf die Projektionen gehören sowohl die Unsicherheit der Dosis-Wirkungs-Funktionen als auch die Variabilität hinsichtlich der vier Klimamodelle.