



DAV

DEUTSCHE
AKTUARVEREINIGUNG e.V.

Ergebnisbericht des Ausschusses Krankenversicherung

Gesundheitliche Folgen des Klimawandels

Köln, 8. November 2022

Präambel

Der Ausschuss Krankenversicherung der Deutschen Aktuarvereinigung e. V. hat den vorliegenden Ergebnisbericht erstellt.¹

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht ist ein Ergebnisbericht der Unterarbeitsgruppe „Klimawandel“ innerhalb der Arbeitsgruppe „Gesundheitstrends in der Krankenversicherung“ und behandelt die speziellen Fragestellungen, welche gesundheitlichen Folgen der Klimawandel zukünftig auf die Gesundheitskosten und die Entwicklung der Leistungsausgaben in der PKV/GKV haben wird und betrifft Aktuare (insbesondere in der Rolle als Verantwortlicher Aktuar und der Versicherungsmathematischen Funktion) bei der Ausführung aktuarieller Aufgaben im Rahmen der Produktgestaltung, des Controllings, des Leistungsmanagements, der Kalkulation und Nachkalkulation von Prämien in der Krankenversicherung sowie der Berichterstattung unter Solvency II.

Der Ergebnisbericht ist an die Mitglieder und Gremien der DAV zur Information über den Stand der Diskussion und die erzielten Erkenntnisse gerichtet und stellt keine berufsständisch legitimierte Position der DAV dar.²

Verabschiedung

Der Ergebnisbericht ist durch den Ausschuss Krankenversicherung am 8. November 2022 verabschiedet worden.

¹ Der Ausschuss dankt der Unterarbeitsgruppe „Gesundheitliche Folgen des Klimawandels“ innerhalb der Arbeitsgruppe „Gesundheitstrends“ ausdrücklich für die geleistete Arbeit, namentlich Alexander Krauskopf (Leitung), Irene Merk, Dr. Ulrich Stellmann.

² Die sachgemäße Anwendung des Ergebnisberichts erfordert aktuarielle Fachkenntnisse. Dieser Ergebnisbericht stellt deshalb keinen Ersatz für entsprechende professionelle aktuarielle Dienstleistungen dar. Aktuarielle Entscheidungen mit Auswirkungen auf persönliche Vorsorge und Absicherung, Kapitalanlage oder geschäftliche Aktivitäten sollten ausschließlich auf Basis der Beurteilung durch eine(n) qualifizierte(n) Aktuar DAV/Aktuarin DAV getroffen werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	4
2. Die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels.....	7
2.1. <i>Gesundheitliche Folgen extremer Hitze</i>	<i>7</i>
2.1.1. Mathematisches Modell zur Ermittlung hitzebedingter Übersterblichkeit	11
2.1.2. Europaweite Analyse von Hitzewellen	14
2.1.3. „Harvesting“ Effekt	16
2.1.4. Situation in Deutschland.....	20
2.1.5. Hitzebedingte Auswirkungen auf Morbidität	26
2.1.6. Hitzebedingte Auswirkungen auf psychische Krankheiten	29
2.1.7. Hitzebedingte Arbeitsunfähigkeit	34
2.2. <i>Zunahme von Infektionskrankheiten</i>	<i>38</i>
2.2.1. Durch Nahrungsmittel und Wasser übertragene Infektionskrankheiten	38
2.2.2. Durch Vektoren übertragene Infektionskrankheiten.....	40
2.2.3. Klimawandel und Corona	47
2.2.4. Mathematisches Modell zur Modellierung von Epidemien	49
2.3. <i>Pollen, Allergien und Luftverschmutzung</i>	<i>52</i>
2.3.1. Pollen und Allergien	52
2.3.2. Luftverschmutzung	56
2.4. <i>UV-Strahlung</i>	<i>62</i>
3. Zusammenfassung und weitere Aspekte	67

1. Einleitung

Seit Anfang der 1970er Jahre, angefangen mit der ersten Umweltkonferenz der Vereinten Nationen 1972 in Stockholm, gibt es wissenschaftliche Untersuchungen, die sich mit dem menschengemachten (anthropogenen) Klimawandel beschäftigen. Das wesentliche Ergebnis dieser Analysen besteht darin, dass das industrielle Wirtschaften des Menschen langfristige Folgen für unsere Umwelt hat, nämlich insbesondere

- eine Veränderung des Klimas auf unserem Planeten,
- Minderung der biologischen Vielfalt,
- Zunahme von Wasser- und Luftverschmutzung,
- Abnahme des stratosphärischen Ozons.

Dies hat negative Auswirkungen auf die natürlichen Lebensgrundlagen und das Wohlbefinden der Bevölkerung.

Neben vielen anderen Berichten, die sich mit den Folgen des Klimawandels beschäftigen, liefert der des **IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change)³ einen fundierten Beitrag zum naturwissenschaftlichen, technischen und sozioökonomischen Stand der Klimaforschung.

Der derzeit aktuelle 6. Sachstandsbericht (AR6)⁴ des IPCC wurde im August 2021 veröffentlicht. Die Basis für die Analysen des IPCC bilden die sogenannten RCP-Szenarien (RCP = Representative Concentration Pathways). Hierbei handelt es sich um Konzentrations-Pfade, bei denen die Treibhausgaskonzentration und der Strahlungsantrieb⁵ den Ausgangspunkt bilden. Die RCP-Szenarien (RCP1.9, RCP2.6, RCP4.5, RCP7.0 und RCP8.5) legen bestimmte Szenarien von Treibhausgasemissionen fest. Klimamodelle errechnen daraus dann die Veränderungen des Klimas. Neben den RCP-Szenarien spielen in dem IPCC-Report auch die sozio-ökonomischen Szenarien SSP (Shared Socioeconomic Pathways) eine wichtige Rolle. Diese beschreiben mögliche global gesellschaftliche und ökonomische Entwicklungen (z. B. Bevölkerungsentwicklung, Entwicklung des BIP), enthalten dabei auch Annah-

³ Diese weltweite Institution (insgesamt sind 195 Regierungen Mitglied des IPCC), die auf Deutsch als „Weltklimarat“ bezeichnet wird, wurde im November 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) gegründet. Das Ziel des IPCC ist es, den politischen Entscheidungsträgern den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Forschung zum Klimawandel zu vermitteln, so dass hierauf wissenschaftsbasierte Entscheidungen zur Bekämpfung des Klimawandels getroffen werden können.

⁴ <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

⁵ Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Änderung der Energiebilanz der Erde durch Änderung der Wirkung der Strahlung aus dem Weltraum und wird in W/m^2 gemessen. Der Begriff wurde vom IPCC eingeführt, um im Rahmen der Klimastudien den Einfluss externer Faktoren auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde zu beschreiben. Solche Faktoren können bspw. die veränderte Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen, veränderte eingehende (absorbierte) solare Strahlung in W/m^2 oder eine veränderte Albedo sein. (Quelle: Wikipedia)

men über die zukünftigen möglichen klimapolitischen Maßnahmen. Die „realisierbaren“ Kombinationen aus SSP- und RCP-Szenarien zeigen somit mögliche zukünftige globale Entwicklungen auf.⁶

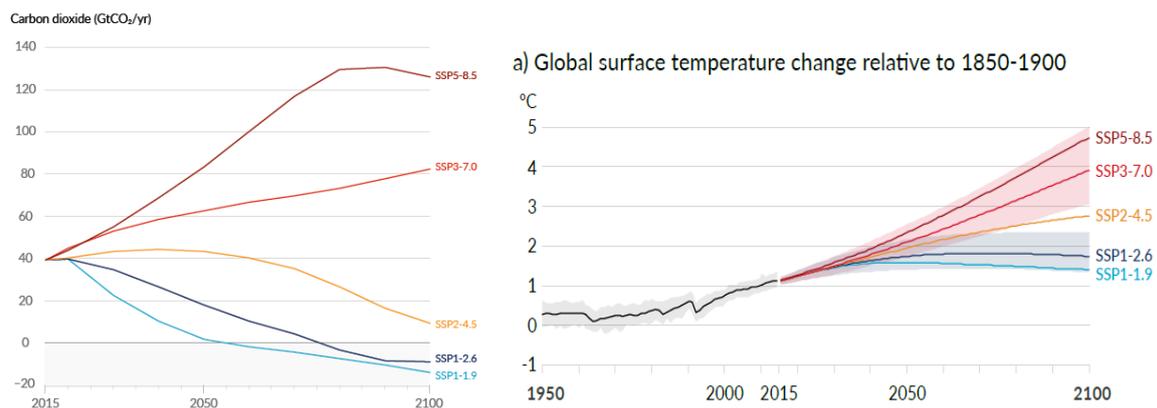


Abb. 1 Projizierte Entwicklungen von CO₂ und Temperaturänderung Quelle: IPCC AR6

Die wesentlichen Aussagen zur Entwicklung des Klimawandels sind die folgenden:

- Es ist belegt, dass der Einfluss des Menschen die Atmosphäre, die Ozeane und die Landflächen erwärmt hat.
- Der vom Menschen verursachte Klimawandel wirkt sich bereits auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus. Seit dem Fünften Sachstandsbericht (AR5) gibt es stärkere Belege für beobachtete Veränderungen von Extremen wie z.B. von Hitzewellen, Starkniederschlägen, Dürren und tropischen Wirbelstürmen sowie insbesondere für deren Zuordnung zum Einfluss des Menschen.
- Auf Basis von verbesserten Kenntnissen über Klimaprozesse, Nachweisen aus der Erdgeschichte und den Reaktionen des Klimasystems auf einen zunehmenden Strahlungsantrieb wird von einer langfristigen globalen Erwärmung von 3°C ausgegangen, wobei die projizierte Volatilität im Vergleich zum AR5 abgenommen hat.
- Die globale Oberflächentemperatur wird bei allen betrachteten Emissionsszenarien (SSP1-1.9 bis SSP5-8.5) bis mindestens Mitte des Jahrhunderts weiter ansteigen. Eine globale Erwärmung von 1,5 °C und 2 °C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, es sei denn, es erfolgen in den kommenden Jahrzehnten drastische Reduktionen der CO₂- und anderer Treibhausgasemissionen.
- Viele Veränderungen im Klimasystem werden in unmittelbarem Zusammenhang mit der ansteigenden globalen Erwärmung zunehmen. Dazu gehören die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzeextremen, marinen Hitzewellen und Starkniederschlägen, landwirtschaftlichen und ökologischen Dürren in

⁶ s. auch "Climate Science: A Summary for Actuaries" (IAA)

einigen Regionen, die Anzahl heftiger tropischer Wirbelstürme sowie Rückgänge des arktischen Meereises, von Schneebedeckung und Permafrost.

- Fortschreitende globale Erwärmung wird den globalen Wasserkreislauf weiter intensivieren, einschließlich seiner Variabilität, sowie globaler Monsunniederschlägen und der Heftigkeit von Niederschlags- und Trockenheitsereignissen.
- Viele Veränderungen, die auf vergangene und künftige Treibhausgasemissionen zurückzuführen sind, sind über Jahrhunderte bis Jahrtausende unumkehrbar, insbesondere Veränderungen der Ozeane, der Eisschilde und des globalen Meeresspiegels.

Wie im IPCC-Report dargestellt, sind die Folgen des Klimawandels sehr vielfältig und beziehen sich sowohl auf die natürlichen Systeme (ökologische Aspekte) als auch auf die gesellschaftlichen Systeme (sozioökonomische Aspekte).

Eine wesentliche Folge des Klimawandels⁷ sind die Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung ("gesundheitliche Folgen"). Diese sollen in den nächsten Kapiteln dieses Berichtes näher dargestellt werden.

⁷ s. IPCC-AR6 WGII Chapter 7 (Health, Wellbeing and the Changing Structure of Communities)

2. Die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels

Bei den gesundheitlichen Folgen des Klimawandels wird unterschieden zwischen den *direkten* und den *indirekten* Auswirkungen.

Die direkten Auswirkungen ergeben sich zum Beispiel durch die Zunahme von Wetterextremen, z. B. Hitze, Stürme, Hochwasser, und zeigen sich sowohl in physischen (z. B. Infektionen, Verletzungen, Todesfälle) als auch in psychischen Folgen (z. B. Stress, Angstzustände, Traumata, Depressionen). Zudem ergeben sich indirekte und langfristige Auswirkungen aus dem Klimawandel wie z. B.

- Zunahme tierischer Krankheitsüberträger (z. B. Zecken, Stechmücken)
- Verändertes bzw. verlängertes Auftreten biologischer Allergene (z. B. Pollen)
- Quantität und Qualität von Trinkwasser und Lebensmitteln
- Luftverschmutzung
- Migration

Im Folgenden wollen wir uns auf vier klimabedingte Gesundheitsaspekte fokussieren, die für Deutschland als die relevantesten angesehen werden können.

2.1. Gesundheitliche Folgen extremer Hitze

Um den globalen Temperaturanstieg in den letzten 30 – 40 Jahren zu verdeutlichen, kann man z. B. die neuesten Klima-Daten ERA5 des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)⁸ betrachten. Hier zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg der globalen Sommertemperatur (Juni, Juli, August auf der Nordhalbkugel, Dezember, Januar, Februar auf der Südhalbkugel) gegenüber dem Durchschnitt der Jahre 1986-2005 im Jahr 2020 um 0,34°C und Bevölkerungsgewichtet sogar um 0,6°C (s. Abb. 2). Wie man an der Figure 2 erkennen kann, ist der Temperaturanstieg in allen Regionen der Welt, wobei insb. das nördliche Sibirien sowie der Südwesten der USA von einem überdurchschnittlichen Anstieg betroffen sind, sichtbar. In Deutschland war, wie Abbildung 3 zu entnehmen, die jährliche Durchschnittstemperatur im Jahr 2020 gegenüber dem Durchschnitt der Jahre 1986-2005 sogar um 1,5°C höher.

⁸ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

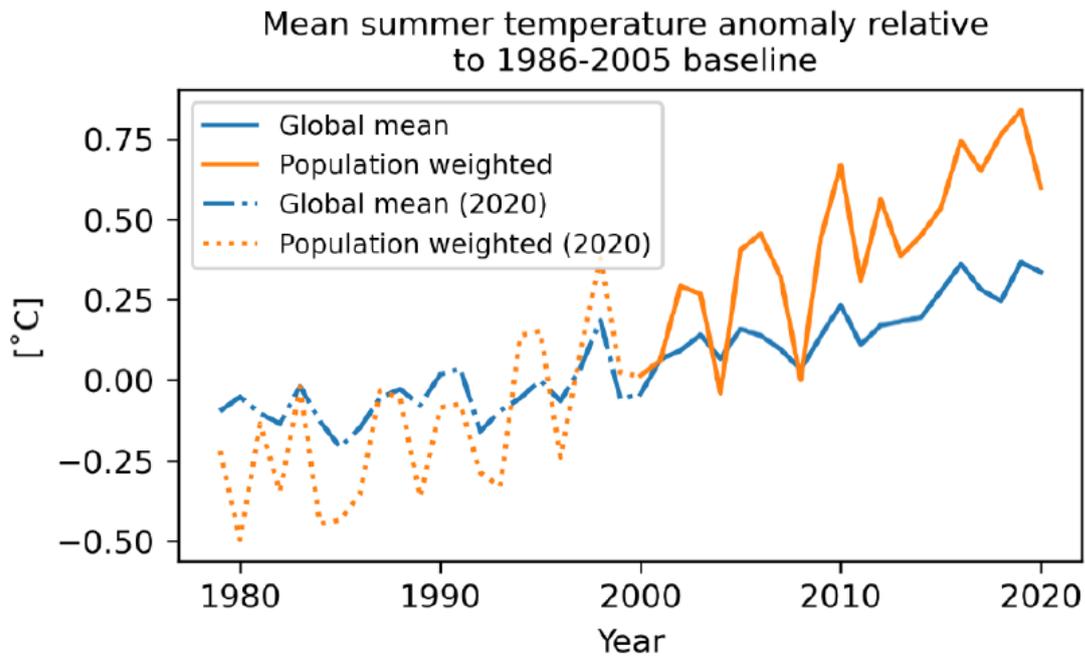


Abb.2: Anstieg der durchschnittlichen Sommertemperaturen (Quelle: ECMWF)

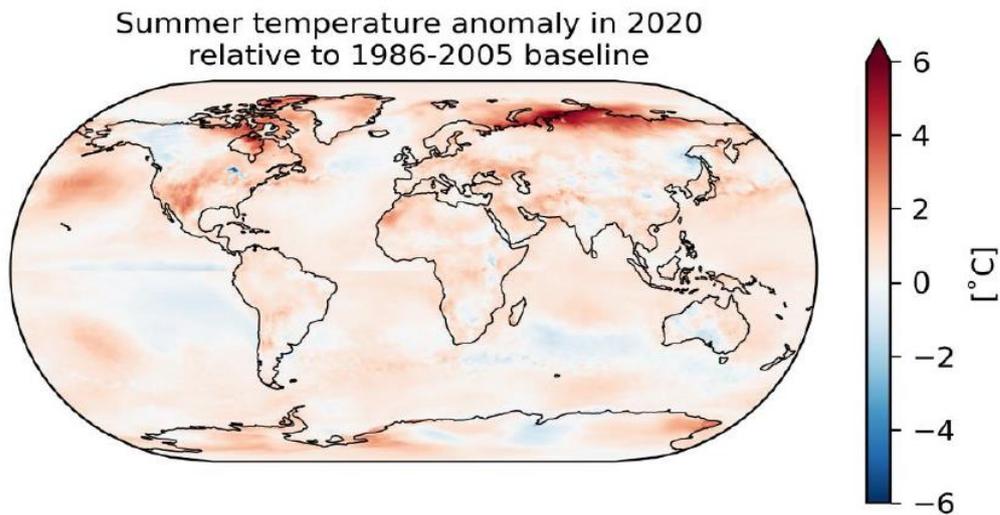
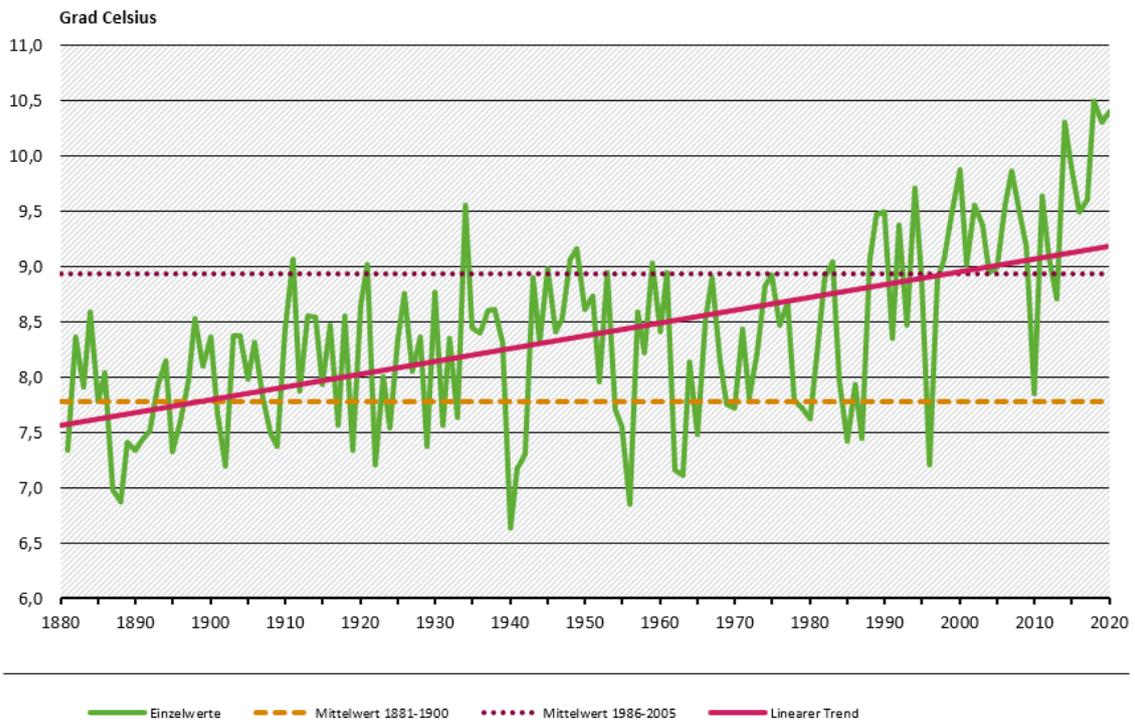


Figure 2. Map of summer temperature anomaly for 2020 relative to the 1986-2005 baseline.

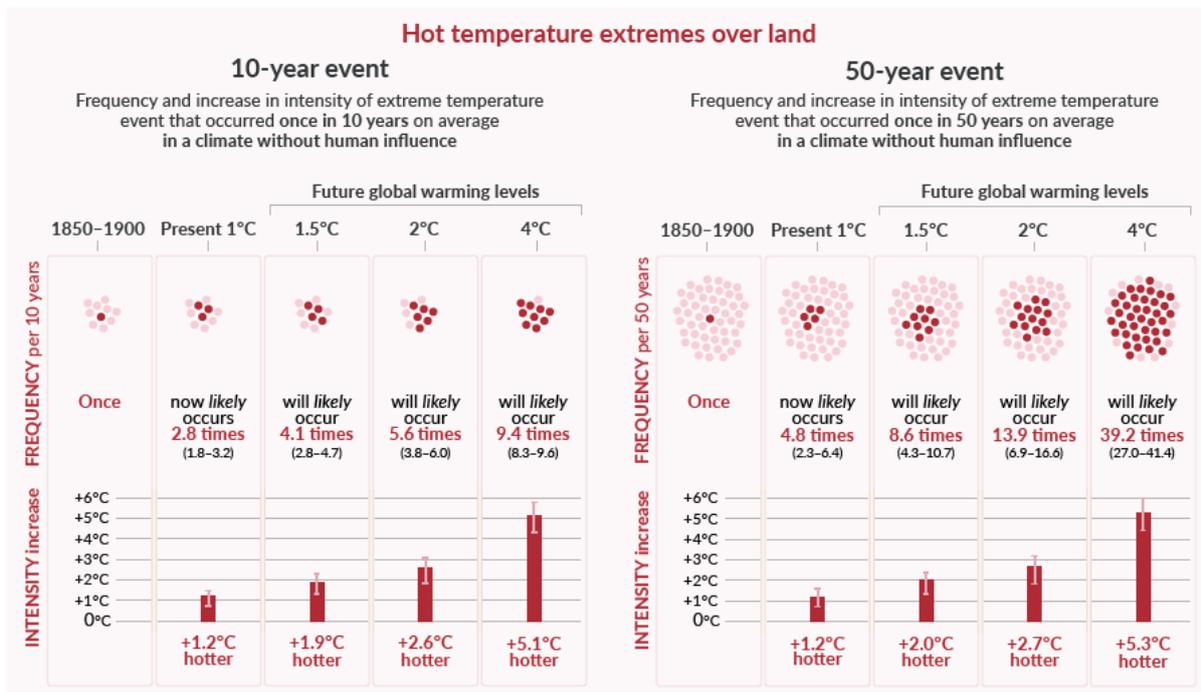
Jährliche mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland 1881 bis 2020



Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), Mitteilung vom 08.04.2021

Abb. 3: Jährliche mittlere Tagestemperatur in Deutschland
Quelle: Bundesumweltamt

Im IPCC AR6 wird sehr deutlich darauf hingewiesen, dass durch die globale Erwärmung die Wahrscheinlichkeit für hitzebedingte Extremereignisse deutlich steigen wird.



Dabei nimmt nicht nur die Häufigkeit von extremen Hitzeereignissen, sondern auch deren Intensität zu.

Bekanntermaßen steigen mit zunehmender Wärmebelastung die Anforderungen an das Herz-Kreislaufsystem, den Bewegungsapparat und die Atmung, wodurch es in der Folge zu einer Zunahme von Lungen- und Herz-Kreislaufkrankungen aber auch Todesfällen kommt.⁹

Eine Folge extremer Hitze ist die Dehydrierung und reduzierte Blutviskosität aufgrund des höheren Flüssigkeitsverlustes, wodurch sich das Risiko für Thrombosen und andere Herz-Kreislaufkrankungen erhöht. Hitzebelastung setzt den Körper ganz generell einem höheren Stress aus, um die Körpertemperatur konstant zu halten. Dieser kann zu einer Verstärkung anderer Erkrankungen (z. B. der Atemwege) führen, weshalb auch hier eine Abhängigkeit der Hitze nachweisbar ist. Einschränkungen der Wärmeregulation im Körper können zu Veränderungen des Wasser- und Elektrolythaushaltes führen, die lebensbedrohliche Beeinträchtigungen des Herz-Kreislaufsystems auslösen können. Hier sind insbesondere Hitzewellen, also Perioden von mehreren aufeinanderfolgenden Tagen mit extremen Temperaturen, problematisch. Es gibt unterschiedliche mögliche konkrete Definitionen von Hitzewellen. Im Rahmen der EUROHEAT-Studie, deren Ergebnisse in Kapitel 2.1.2 gezeigt werden, werden Hitzewellen wie folgt definiert:

Betrachtet werden zwei Temperaturen:

$$T_{app} = -2,653 + 0,994 \cdot T_{air} + 0,0153 \cdot T_{dewpt}^2 \text{ (gefühlte Temperatur)}$$

mit T_{air} (Lufttemperatur) und T_{dewpt} (Taupunkttemperatur = Kondensationspunkt der Luft) und

T_{min} (Tagestiefsttemperatur)

Eine Hitzewelle wird definiert als

- 1) Zeitraum von mindestens zwei aufeinanderfolgenden Tagen, an denen $T_{app,max}$ das 90% Quantil der monatlichen Verteilung überschreitet, oder
- 2) Zeitraum von mindestens zwei aufeinanderfolgenden Tagen, an denen T_{min} das 90% Quantil und $T_{app,max}$ den Median der monatlichen Verteilung überschreitet.

Hierdurch werden extreme Tagestemperaturen über die maximale, gefühlte Temperatur $T_{app,max}$ und auch hohe Nachttemperaturen über T_{min} in der Definition einer Hitzewelle berücksichtigt. Eine neuere Definition von Hitzewelle setzt voraus, dass in einem Zeitraum von mindestens zwei aufeinanderfolgenden Tagen sowohl die tägliche Höchst- als auch Tiefsttemperatur über dem 95%-Quantil der Verteilung liegt (Quelle: World Meteorological Organization)¹⁰.

⁹ Selbstverständlich führen auch Kältebelastungen zu einer starken Beanspruchung des menschlichen Organismus, was aber nicht im Fokus dieser Ausarbeitung steht.

¹⁰ Global predictability of temperature extremes (de Perez et. al. 2018)

Die hitzebedingten gesundheitlichen Folgen betreffen allerdings nicht alle Teile der Bevölkerung gleichermaßen. Durch Hitzestress gefährdete Personen sind insbesondere

- Säuglinge und Kleinkinder (da sie ihre Körpertemperatur und ihre Schweißproduktion nicht gut regulieren können und daher zu Hitzestaus neigen, und zudem geringere Flüssigkeitsreserven besitzen und leichter dehydrieren),
- ältere Personen (da sie weniger Wasser und mehr Fett im Organismus und außerdem ein geringeres Durstempfinden haben), und
- Menschen mit Vorerkrankungen des Herz-Kreislaufsystems, der Atemwege oder Diabetes.

Eine verringerte Luftqualität bei erhöhten Konzentrationen von Stickoxiden, Ozon und Feinstaub, die in Kombination mit Hitzeextrema auftreten können, erhöht die gesundheitlichen Risiken und das Sterblichkeitsrisiko noch zusätzlich. Hiervon ist insbesondere die städtische Bevölkerung betroffen, da Städte bis zu 10° C wärmer sein können als weniger dicht besiedelte Regionen.

Aufgrund der zu erwartenden demographischen Entwicklung in Deutschland bis zum Jahr 2050 wird der Anteil der gefährdeten Bevölkerungsgruppe deutlich zunehmen und sich das Problem der hitzebedingten gesundheitlichen Probleme weiter verstärken.

2.1.1. Mathematisches Modell zur Ermittlung hitzebedingter Übersterblichkeit

Die hitzebedingte Übersterblichkeit E_q an einem Tag kann wie folgt beschrieben werden:

$$E_q = q \cdot L \cdot AF$$

Mit

q = (nicht-verletzungsbedingte) Sterberate pro Tag (z. B. aus jährlicher (nicht-verletzungsbedingter) Sterberate (für Geschlecht und Alter / Altersgruppe) ermittelbar durch gleichmäßige Verteilung auf die Tage (Division durch 365))¹¹

L = Anzahl der betrachteten Personen (in der betrachteten Grundgesamtheit, z. B. Geschlecht und Alter / Altersgruppe)

AF = Anteil der hitzebedingten Toten (attributable fraction)

AF wird über das relative Risiko (RR) ermittelt. Bei einer optimalen Temperatur (OT) ergibt sich das Normalrisiko für eine hitzebedingte Sterblichkeit. Bei Abweichungen von OT (nach oben und unten) ergeben sich höhere temperaturbedingte Todesfälle. Daher kann AF wie folgt dargestellt werden:

$$AF = \frac{RR - 1}{RR}$$

¹¹ Datenquelle: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) Global Health Data Exchange (GHDx). Global Burden of Disease. Available at <http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>. 2021

Das bedeutet, dass bei einem relativen Risiko von 10%, also $RR=1,1$, AF den Anteil der Übersterblichkeit bezogen auf die höhere Gesamtsterblichkeit angibt ($AF=0,1/1,1= 9,09\%$).

Zur Herleitung des RR gibt es unterschiedliche statistische Verfahren. Ein mögliches Verfahren stellt das distributed lag non-linear model (DLNM) dar. Mit diesem Modell, das auf einer Zeitreihenanalyse beruht, kann eine Expositions-Wirkungs-Abhängigkeit (exposure-response-function, ERF) beschrieben werden, wobei auch zeitliche Verzögerungseffekte („lag“) berücksichtigt werden. In dem Artikel „Heat-related mortality risk model for climate change impact projection“ (Honda et al.) wird die Parametrisierung eines DLNM beschrieben (eine allgemeine Darstellung des DLNM findet man z. B. in Distributed lag non-linear models, A. Gasparrini et al., 2009). Dort wird zum einen die Abweichung der täglichen Höchsttemperatur von OT als auch eine zeitliche Verzögerung der Wirkung auf die Todesfälle (lag von 0 bis 15 Tage) betrachtet.

Ein anderes Verfahren zur Ermittlung der hitzebedingten Übersterblichkeit wird in „Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015“ (an der Heiden et al.) benutzt. Dort verwendet man ein generalisiertes additives Modell (GAM) mit logarithmischer Linkfunktion und negativ-binomialer Verteilung.

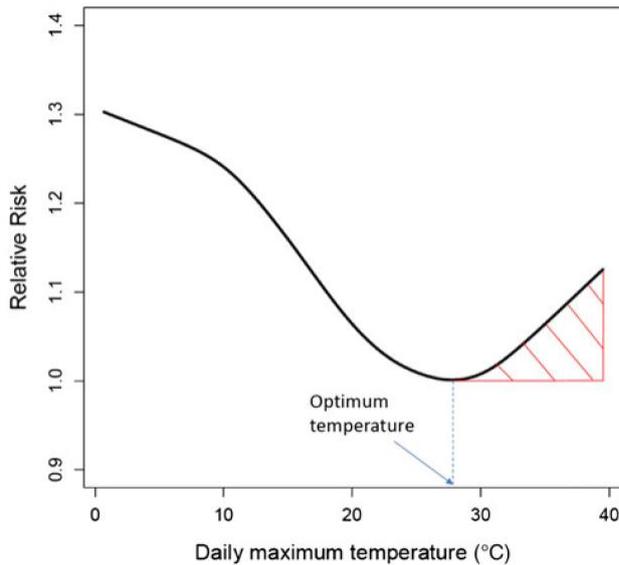
Im Ergebnis ergibt sich eine ERF der folgenden Form:

$$RR = e^{\beta(t-OT)}$$

und damit lässt sich AF wie folgt schreiben:

$$AF = \frac{RR - 1}{RR} = 1 - e^{-\beta(t-OT)}$$

Einen typischen Verlauf für die EFR zeigt die folgende Grafik, die aus obigem Artikel von Honda et al. entnommen ist:



Hier zeigt sich deutlich, dass die temperaturbedingte Sterblichkeit sowohl infolge von Hitzeextremen als auch bei sehr niedrigen Temperaturen ansteigt.

Im Lancet Countdown 2021¹² wird mit dem oben beschriebenen Verfahren von Honda et al. die hitzebedingte Sterblichkeit ermittelt. Insgesamt gab es weltweit 345.000 Hitzetote in 2019, was einem prozentualen Anstieg gegenüber dem Durchschnitt der Jahre 2000-2005 von 80,6% entspricht. Die globale Verteilung der Hitzetoten (über 65 Jahre) zeigt die folgende Grafik:

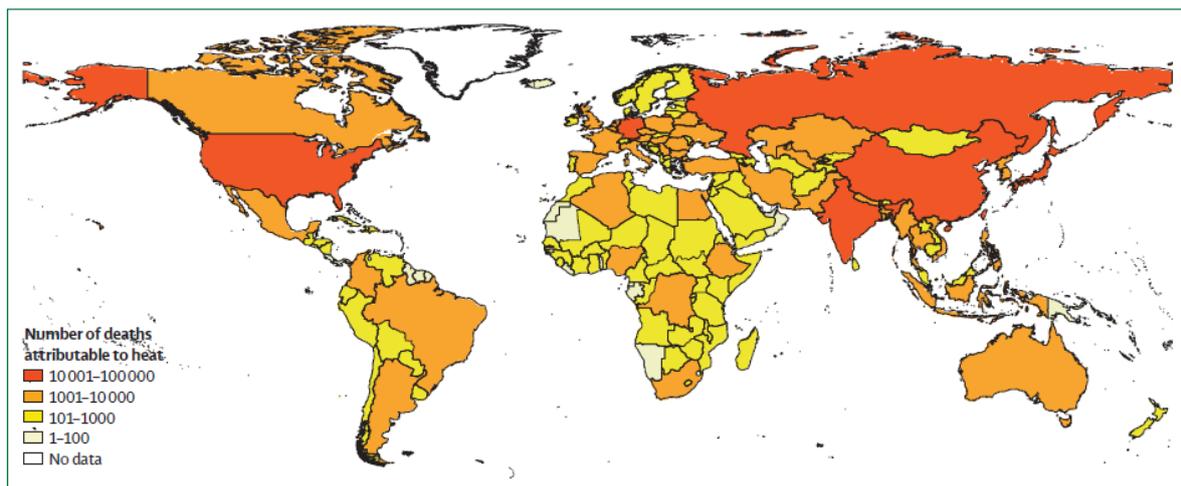


Figure 5: Heat-related deaths of people older than 65 years in each country in 2019

Den stärksten absoluten Zuwachs an Hitzetoten von 2018 nach 2019 hatten Indien und Brasilien zu verzeichnen. Obwohl in Europa (genauer in der Europäischen Region der WHO) die hitzebedingte Sterblichkeit aufgrund weniger Hitzetoten in Deutschland, UK und Russland in 2019 zurückgegangen ist, hat diese Region aus unterschiedlichen Gründen mit knapp 108.000 Todesfällen immer noch die größte absolute Anzahl an hitzebedingten Todesfällen.

¹² [https://www.thelancet.com/article/S0140-6736\(21\)01787-6/fulltext](https://www.thelancet.com/article/S0140-6736(21)01787-6/fulltext)

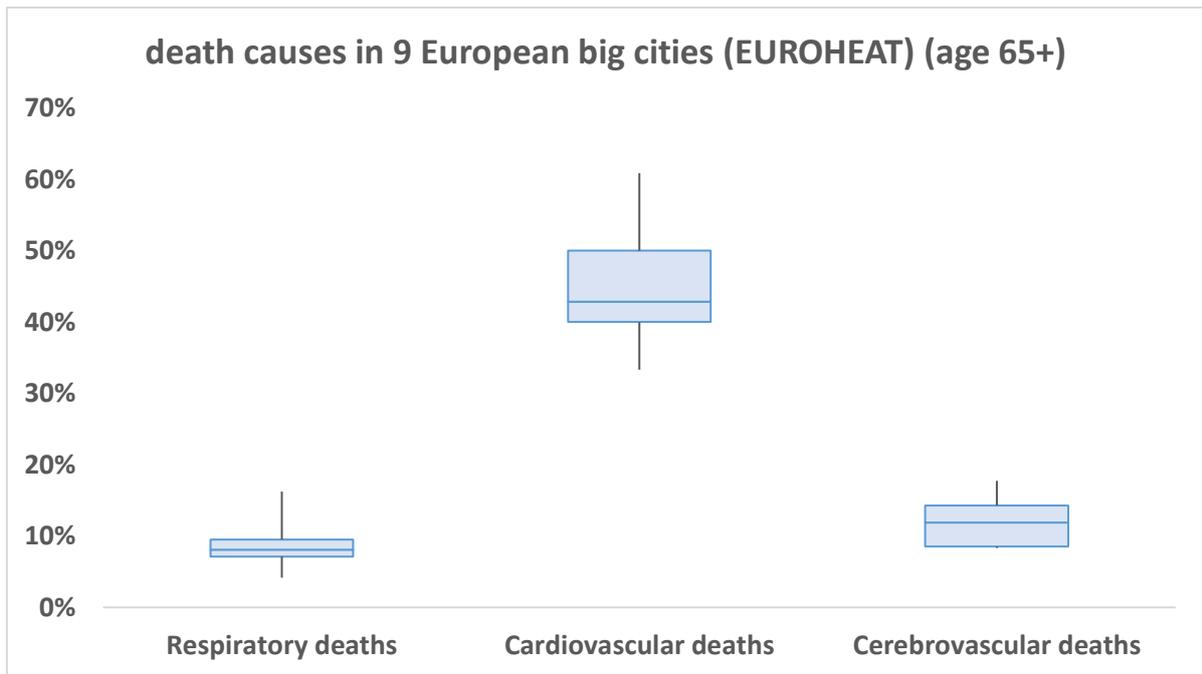
2.1.2. *Europaweite Analyse von Hitzewellen*

Hinweisen möchten wir in diesem Zusammenhang auch noch auf eine europaweite Analyse von Hitzewellen, insb. der ersten Hitzewelle in diesem Jahrtausend im Jahr 2003. Das EuroHeat-Projekt¹³ hat sich dabei zum Ziel gesetzt, eine standardisierte Definition von Hitzewellen (s. oben) zu entwickeln und die Auswirkungen auf die Sterblichkeit (getrennt nach Geschlecht, Alter und Todesursache) in Europa für die Sommer von 1990 bis 2004 und eben speziell für das Jahr 2003 im Hinblick auf die Dauer und Intensität der Hitzewellen abzuschätzen und zu vergleichen.

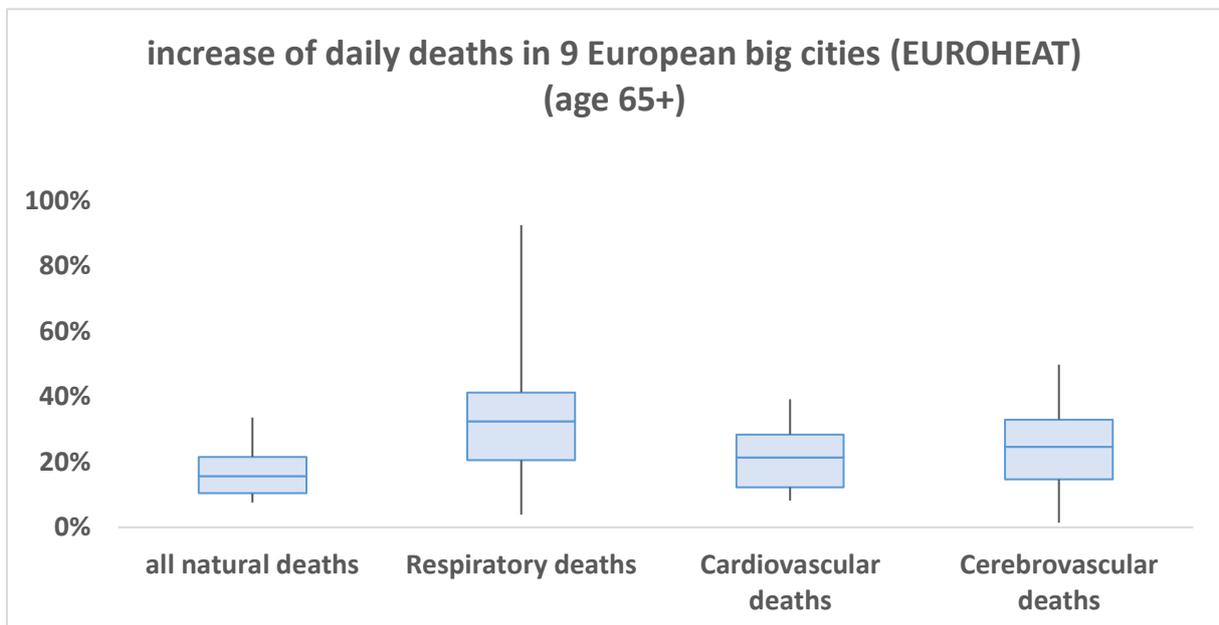
Zur Klassifizierung der Hitzewellen wurden sowohl die maximalen als auch die minimalen Tagestemperaturen sowie die Dauer, Intensität und Zeitpunkt während des Sommers betrachtet. Die hitzebedingte Übersterblichkeit wurde durch Vergleich der Todesfälle der Personen über 65 Jahre an Tagen während der Hitzewelle mit der Anzahl der Todesfälle an Tagen ohne Hitzewelle ermittelt. Betrachtet wurden neun große Städte in Europa (Athen, Barcelona, Budapest, London, Mailand, München, Paris, Rom und Valencia). Die Ergebnisse differieren stark zwischen den unterschiedlichen Metropolen. Zunächst zeigt sich, dass in allen Städten (mit Ausnahme von Athen) die maximale und minimale Temperatur im Jahr 2003 höher als in allen anderen betrachteten Jahren und die Länge der Hitzewelle überall außer in Athen, Budapest und London länger war. In allen Jahren außer 2003 ergab sich während Hitzewellen ein Anstieg der Sterblichkeit um durchschnittlich 16,2%, wobei der Anstieg zwischen 7,6% (München) und 33,6% (Mailand) schwankt. Bei langanhaltenden und intensiven Hitzewellen war der Anstieg sogar bis zu dreimal so hoch.

Die allgemeine Verteilung der täglichen Todesfälle über alle Städte sieht wie folgt aus:

¹³ The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project, 2010



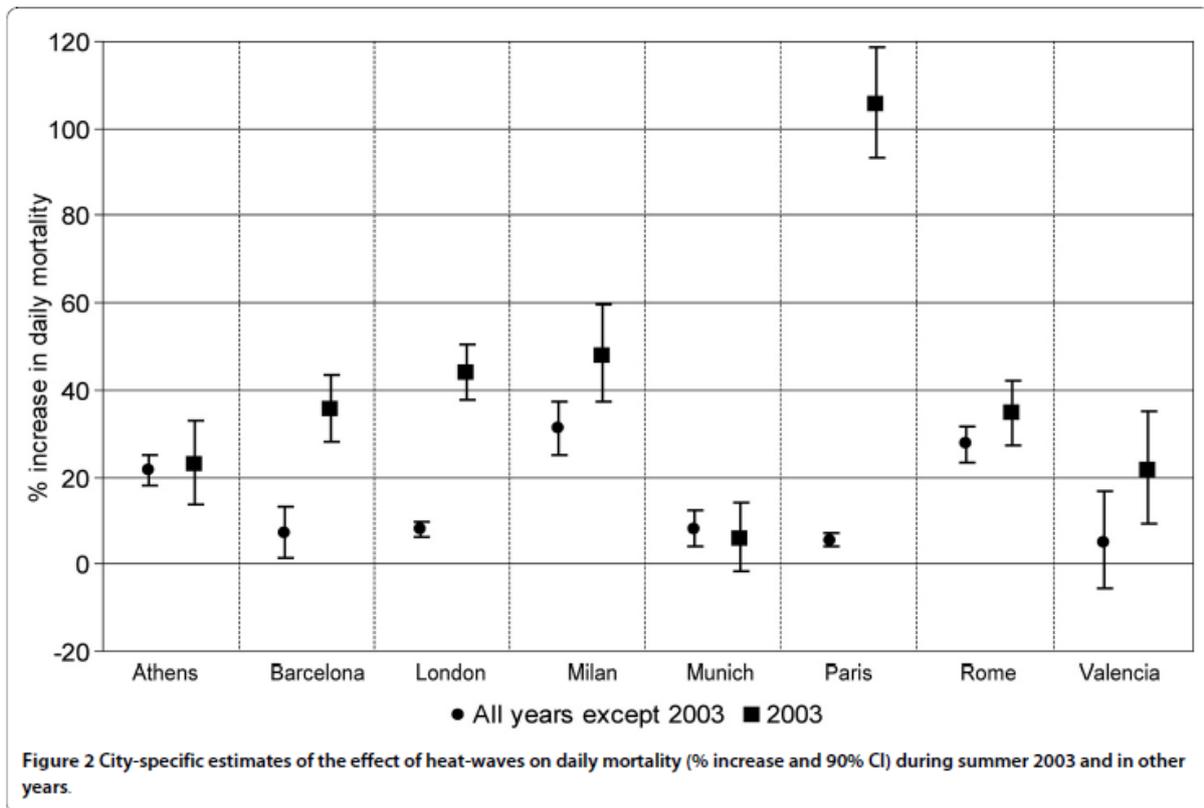
Bei einer hitzewellenbedingten Zunahme der Todesfälle sieht man dies auch bei den häufigsten Todesursachen:



Das heißt, dass insgesamt der Anteil der Herz-/Kreislaufkrankungen am größten ist, der stärkste hitzebedingte Anstieg sich aber bei den Atemwegserkrankungen ergibt.

Betrachtet man nun die Sterblichkeit der über 65-jährigen im Jahr 2003, so erkennt man, dass der hitzebedingte Anstieg der täglichen Sterblichkeit gegenüber den anderen Jahren in fast allen Städten deutlich größer ist (Ausnahmen: Athen und München, wobei in Athen im Jahr 2003 keine außergewöhnliche Hitzewelle zu beobachten war). Die größten Anstiege waren in Barcelona (+7,1% vs. +35,7% in

2003), London (+7,9% vs. +43,8% in 2003) und Paris (+5,5% vs. 105,5% in 2003) zu beobachten.



Des Weiteren zeigen die zusammengefassten Ergebnisse, dass in mediterranen Städten die Auswirkungen auf die Gesamtsterblichkeit größer sind (+21,8%) als in nordkontinentalen Städten (+12,4%). Außerdem zeigen sich Unterschiede zwischen den Geschlechtern und den einzelnen Altersgruppen. Der Anstieg der Sterblichkeit ist bei Frauen größer als bei Männern. Zudem sind die Auswirkungen in höheren Altern (insb. über 75 Jahre) besonders hoch.

2.1.3. „Harvesting“ Effekt

Eine weitere Frage, die im Rahmen hitzebedingter Todesfälle häufig diskutiert wird, ist, inwieweit sich durch die Zunahme an Todesfällen aufgrund von Hitzeextremen / Hitzewellen der Todeszeitpunkt eventuell nur um einen geringen Zeitraum nach vorne verschiebt, die betroffenen Personen also auch ohne die Hitzeeinwirkung bald verstorben wären. Dies würde bedeuten, dass die Gesamtsterblichkeit über einen längeren Zeitraum betrachtet, weniger beeinflusst wird („Harvesting“-These). Hierzu wurden unterschiedliche Auswertungen durchgeführt. Im Lancet Countdown wird hierzu folgendes erläutert:

Die WHO (World Health Organization, Weltgesundheitsorganisation) gibt folgende Definition von verlorenen Lebensjahren (YLL, years of life lost):

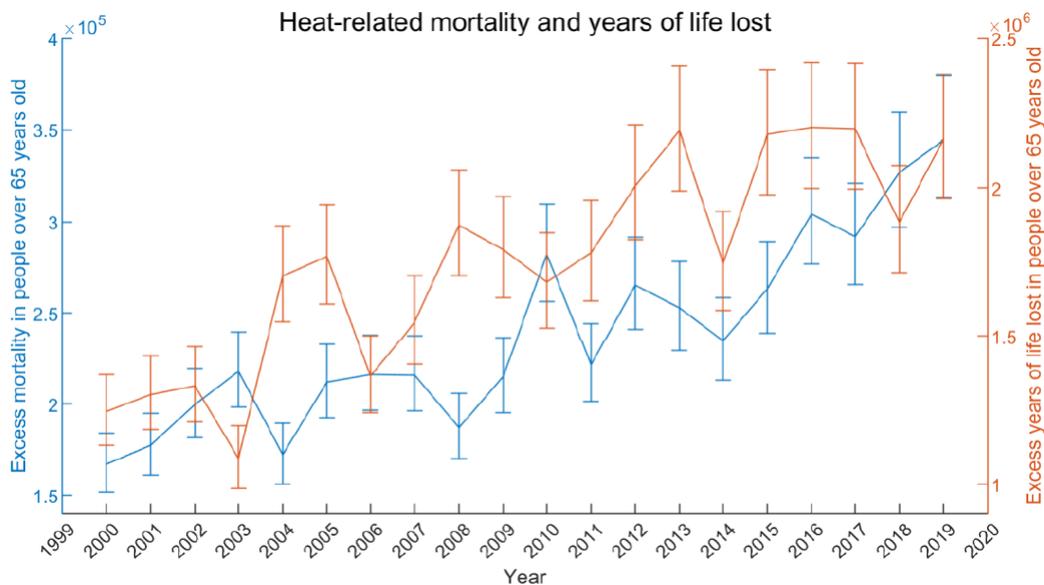
$$YLL := \sum_{m=65}^{100+} Eq_m \cdot LE_m$$

mit

Eq_m = jährliche hitzebedingte Übersterblichkeit im Alter m (für eine bestimmte geografische Region)

LE_m = normale Lebenserwartung in Jahren im Todesalter m (für eine bestimmte geografische Region)¹⁴

Die für die Analysen im Rahmen des Lancet Countdown verwendete normale Lebenserwartung wurde aus den Daten der „Global Burden of Disease Study 2019 (GBD 2019)“ des Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) entnommen. Dabei wurden die YLL zunächst für kleine Regionen ermittelt und dann für Zwecke der Zeitreihenanalyse auf globaler Ebene zusammengefasst. Dabei zeigt sich folgendes Bild:



Sowohl die hitzebedingte Übersterblichkeit als auch die dadurch verlorenen Lebensjahre bei Personen über 65 Jahre haben weltweit in den letzten 15 Jahren deutlich zugenommen.

Alleine diese Auswertung legt die Annahme nahe, dass sich die Lebenserwartung durch die Zunahme von Hitzeextremen verringert hat und auch zukünftig verringern wird. Dies scheint die Harvesting-These nicht zu bestätigen.

Der Artikel „Longer-Term Impact of High and Low Temperature on Mortality: An International Study to Clarify Length of Mortality Displacement“ (B. Armstrong et

¹⁴ Hinweis: Da sich die hitzebedingte Sterblichkeit im Lancet Countdown auf Personen über 65 Jahre bezieht, werden in der Definition von YLL auch nur die über 65-jährigen betrachtet. Die Definition ist natürlich auch auf andere Altersbereiche erweiterbar.

al.) aus dem Jahr 2017 beschäftigt sich ebenfalls mit dem Zusammenhang zwischen jährlicher Sterblichkeit und den jährlich beobachteten Temperaturen (Hitze und Kälte) an 278 Orten in 12 Ländern. Dabei wird die jährliche Sterberate zum einen in Abhängigkeit der mittleren jährlichen Temperatur über / unter der MMT (minimum mortality temperature = tägliche optimale Durchschnittstemperatur mit geringster Sterblichkeit) als auch in Abhängigkeit des jährlichen Anteils der Übersterblichkeit aufgrund von Hitze und Kälte bestimmt. Im Wesentlichen ergeben sich folgende zwei Regressionsmodelle:

$$\ln(Y_{i,t}) = \alpha_i + \beta_{heat} \cdot heat_degrees_{i,t} + \beta_{cold} \cdot cold_degrees_{i,t} + s_i(t, df_i) + \omega_t + \varepsilon_t$$

$$\ln(Y_{i,t}) = \alpha_i + \beta_{heat} \cdot heat_AFdaily_{i,t} + \beta_{cold} \cdot cold_AFdaily_{i,t} + s_i(t, df_i) + \omega_t + \varepsilon_{i,t}$$

mit

$Y_{i,t}$ = durchschnittliche tägliche Sterblichkeit im Jahr t an Ort i

$$heat_degrees_{i,t} = \sum_{d=1}^{365} \max(temp_{i,t,d} - MMT_i, 0)$$

$$cold_degrees_{i,t} = \sum_{d=1}^{365} \max(MMT_i - temp_{i,t,d}, 0)$$

$temp_{i,t,d}$ = mittlere Tagestemperatur am Tag d des Jahres t an Ort i

$heat_AFdaily_{i,t} / cold_AFdaily_{i,t}$ = jährlicher Anteil der Todesfälle, der auf Hitze bzw. Kälte zurückzuführen ist

$s_i(t, df_i)$ (kubischer Spline) sowie ω_t und $\varepsilon_{i,t}$ (Gauß'sches weißes Rauschen) Bestandteile der Regressionsgleichung.

Wenn nun die Koeffizienten β_{heat} und β_{cold} im ersten Regressionsmodell beide positiv sind, so deutet dies auf ein Vorziehen der Temperatur-bedingten Sterblichkeit um mindestens ein Jahr hin. Allerdings kann man mit Modell (1) nicht erkennen, welcher Anteil der Sterbefälle verschoben ist. Dies lässt sich mit Modell (2) abschätzen, was an folgendem einfachen Beispiel veranschaulicht werden soll:

Angenommen 2% der Todesfälle entfallen auf Hitze und keiner auf Kälte. Dann ist $heat_AFdaily_{i,t}$ gleich 2%. Wenn nun alle Toten um ein Jahr vorgezogen sind, müsste die Sterblichkeitsrate um den Faktor 1,02 steigen. Da $\ln(1,02) \approx 0,02$ ergibt sich in diesem Fall $\beta_{heat} = 1$.

D. h. die Koeffizienten β_{heat} und β_{cold} in Modell (2) lassen sich wie folgt interpretieren:

Falls die β -Koeffizienten Null sind, so ergeben sich nur kurzfristige (unter einem Jahr) Verschiebungen der Todesfälle aufgrund von Hitze bzw. Kälte. β -Koeffizienten von 1 bedeuten ein Vorziehen der hitze- / kältebedingten Sterbefälle um mindestens ein Jahr. Im Fall von $\beta \in (0,1)$, so sind einige, aber nicht alle, Hitze-/Kältebedingten Todesfälle um mehr als ein Jahr verschoben. Temperatur-bezogene Einflüsse können auch über einen längeren Zeitraum eine Rolle spielen und nicht direkt den täglichen Todesfällen entsprechend zugeordnet werden. Falls alle (nicht nur die zuordenbaren hitze- / kältebedingten) Todesfälle um mehr als ein Jahr

verschoben sind, würde sich $\beta > 1$ ergeben. Es könnte also theoretisch auch der Fall auftreten, dass sich allgemeine Sterblichkeitsverschiebung und nur kurzfristige Temperatur-bedingte Verschiebungen ausgleichen und z. B. $\beta = 1$ ergeben.

Die Analyse der 278 Orte in 12 Ländern hat nun folgendes ergeben:

In Table 1 werden einige KPI's (Länge der Beobachtungszeitreihe, MMT, mittlerer zuordenbarer Anteil an Hitze- / Kältetoten (ihre Standardabweichungen) und durchschnittliche Temperatur über / unter der MMT (ihre Standardabweichungen)) dargestellt. Teilweise ist die lokale Variation der betrachteten Indizes eher gering (z. B. entspricht in Irland die MMT dem 97%-Quantil der Temperatur, der Anteil der hitzebedingten Toten beträgt nur 0,03% und die Standardabweichung 0,05%), wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt ist.

Table 1. Summary descriptive statistics by country.

Country	n	Period	MMT (percentile)	Mean (SD) AF%		Mean (SD) °C	
				Heat	Cold	Heat	Cold
Australia	3	1988–2008	22.8 (82%)	0.5 (0.2)	5.9 (0.5)	0.4 (0.1)	4.8 (0.3)
Brazil	15	1997–2010	25.1 (62%)	0.7 (0.3)	2.5 (0.5)	0.5 (0.1)	1.7 (0.2)
Canada	21	1986–2010	17.2 (82%)	0.5 (0.2)	5.1 (0.3)	0.5 (0.2)	11.1 (0.8)
Ireland	6	1984–2006	17.5 (97%)	0.0 (0.0)	11.3 (1.1)	0.0 (0.0)	7.8 (0.5)
Italy	2	1988–2009	21.8 (78%)	1.7 (1.4)	9.8 (0.9)	0.7 (0.3)	7.5 (0.5)
Japan	47	1972–2011	24.8 (84%)	0.4 (0.2)	10.5 (0.8)	0.4 (0.2)	10.1 (0.6)
South Korea	7	1992–2009	25.6 (90%)	0.3 (0.3)	6.6 (0.2)	0.2 (0.1)	12.0 (0.5)
Spain	50	1990–2009	21.4 (78%)	1.1 (0.5)	5.6 (0.7)	0.6 (0.2)	6.6 (0.5)
Taiwan	3	1994–2006	25.8 (55%)	0.9 (0.2)	3.8 (0.6)	1.1 (0.1)	2.9 (0.3)
United Kingdom	10	1993–2005	17.2 (90%)	0.3 (0.2)	8.4 (0.8)	0.2 (0.1)	6.9 (0.4)
United States	114	1985–2005	24.3 (83%)	0.3 (0.2)	5.4 (0.3)	0.4 (0.1)	9.8 (0.6)

Note: The table shows number *n* of locations, period of study (start years of first to last complete Nov–Oct year), and the mean over locations of MMT from daily analyses (in degrees and as percentile), mean, and SD over included years of annual attributable fraction of deaths estimated due to heat and cold using methods identical those for a previously published daily analysis (Gasparrini 2015), and mean (SD) of annual mean degrees above and below the MMT. AF, attributable fraction; MMT, minimum mortality temperature; SD, standard deviation.

Interessant sind nun insb. die Ergebnisse für die β -Koeffizienten. Wie in Figure 2 zu sehen ist, liegen sowohl β_{heat} als auch β_{cold} in der aggregierten Sicht nahe bei 1, nämlich bei 0,8 (95%-Konfidenzintervall: [0,2;1,3]) bzw. 1,1 (95%-Konfidenzintervall: [0,9;1,4]). Dies deutet darauf hin, dass über das gesamte Jahr gesehen ungefähr genauso viele hitze- / kältebedingte Todesfälle zu beobachten sind, wie in den täglichen Analysen und diese somit um mindestens ein Jahr vorgezogen eingetreten sind (und nicht nur einen kurzen Zeitraum früher).

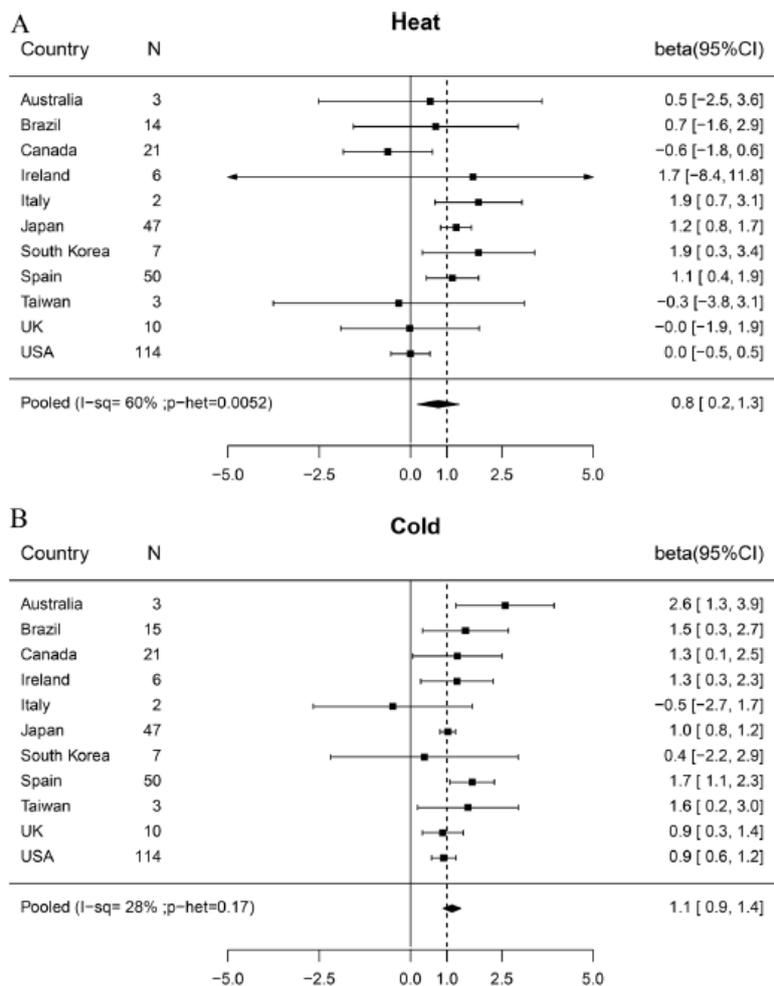


Figure 2. Association of annual mortality with mean annual deaths attributed to heat and cold by daily analysis (model 2). (A) Heat, (B) Cold. Betas are regression coefficients for $\log(\text{mortality})$ on fraction of deaths attributable to heat and cold in daily analyses; a value of 1.0 indicates exactly the deaths expected from daily analyses if all such deaths were displaced beyond the year end.

Auch auf Basis von deutschen Daten (Krankenhauseinweisungen und Sterbefällen) in den Jahren 1997 bis 2008 wurde eine vergleichbare Analyse durchgeführt¹⁵. Dabei hat sich kein eindeutiges Bild gezeigt. Für Herz-/Kreislaufkrankungen und Krebspatienten kann man die Harvesting-These bestätigen. Bei Erkrankungen durch Infektionskrankheiten und Stoffwechselkrankheiten wird die Harvesting-Theorie hingegen nicht bestätigt.

2.1.4. Situation in Deutschland

Nach den allgemeinen Betrachtungen des Zusammenhangs zwischen Sterblichkeit und Hitzewellen, der auf internationalen Artikeln / Studien beruht, wollen wir nun auf die Situation in Deutschland eingehen.

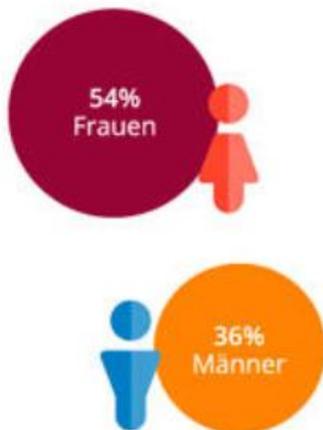
Die extremen Wetterverhältnisse stellen ein Risiko für die Gesundheit des Menschen dar. Umfragen in Deutschland belegen sehr deutlich, dass das Wohlbefinden der Menschen bei extremer Hitze leidet.

¹⁵ Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany (Martin Karlsson, Nicolas Robert Ziebarth, 2018)

Was die Hitze mit uns macht

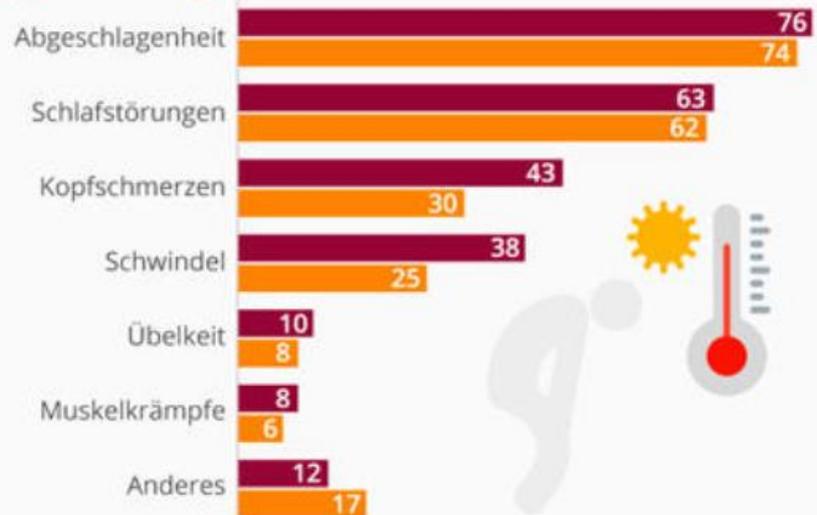
Anteil der Befragten, die durch die Hitzewelle unter folgenden Beschwerden leiden (in %)

Befragte, denen es durch die momentane Hitzewelle schlechter geht als an "normalen" Sommertagen



Beschwerden der Betroffenen

■ Frauen ■ Männer

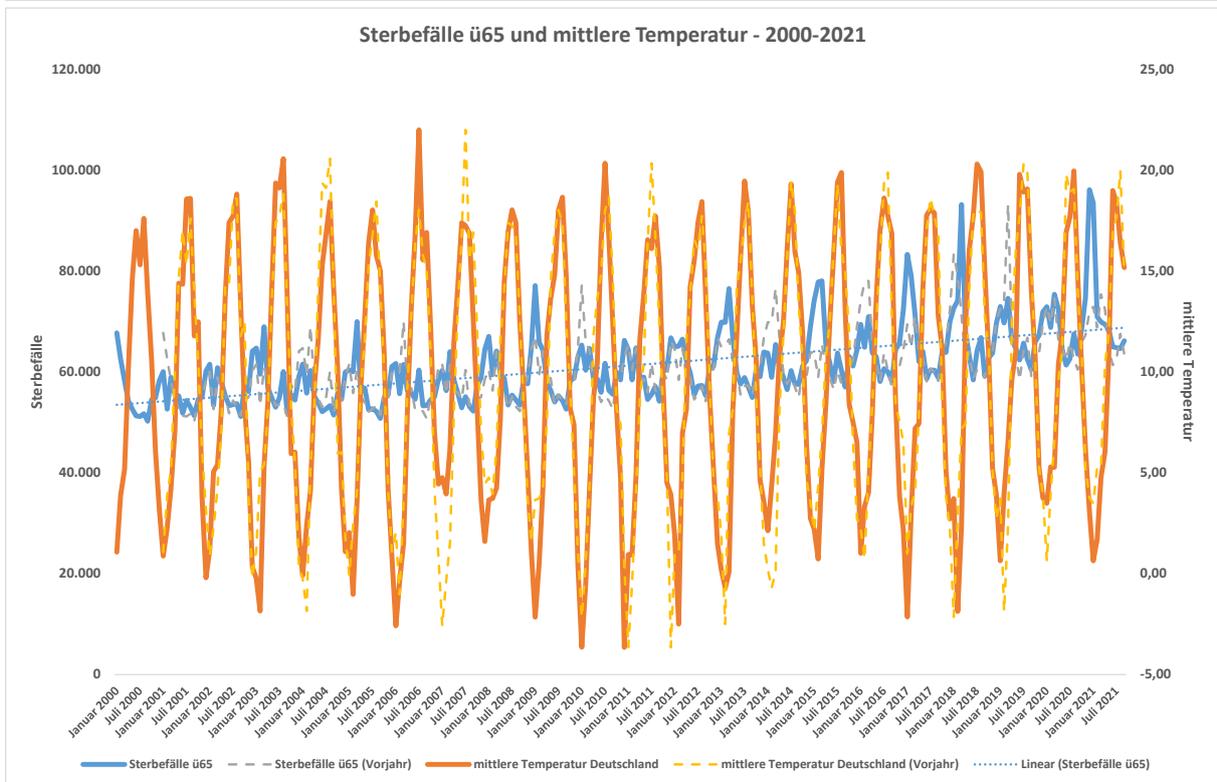
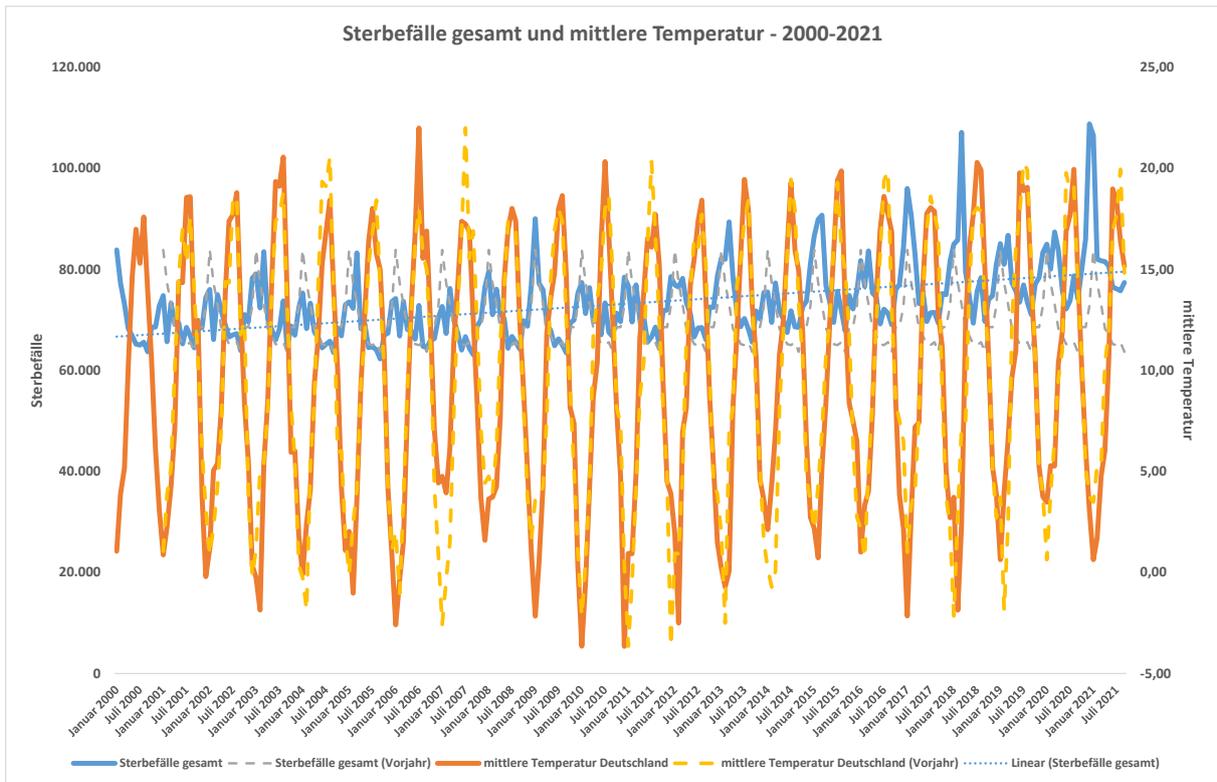


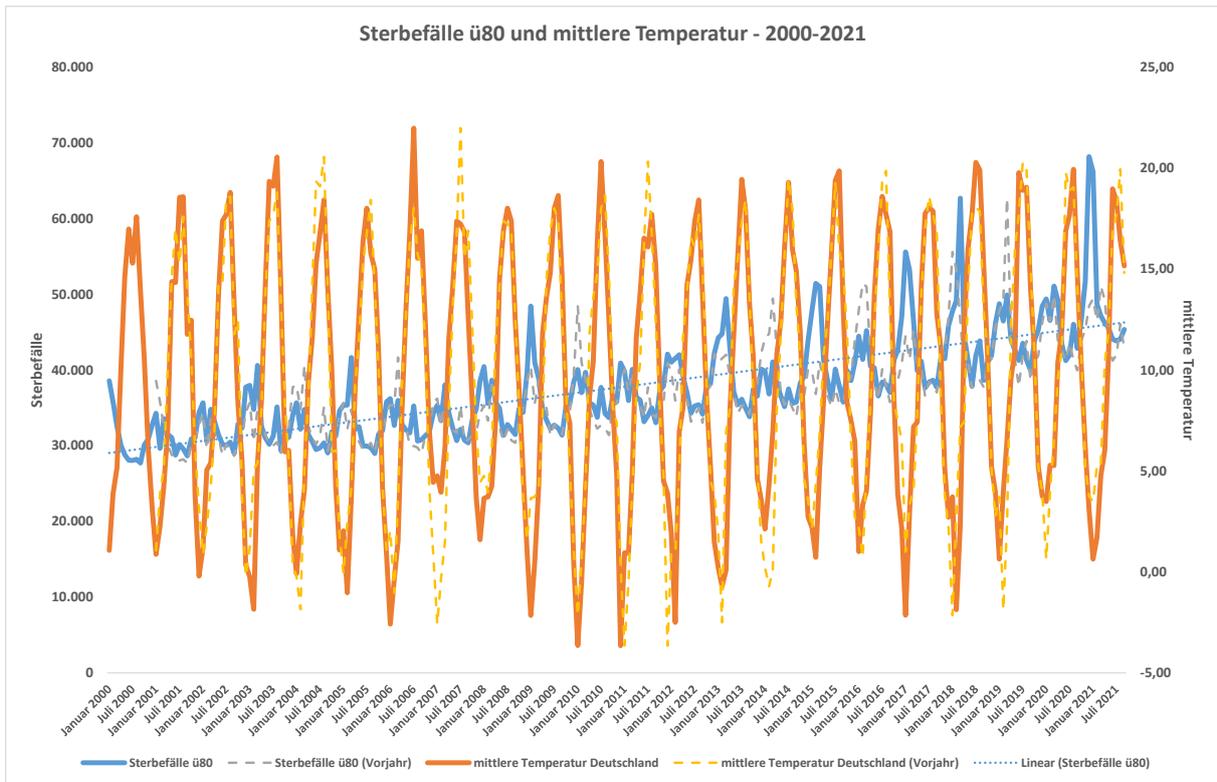
Basis: 1.002 Befragte (ab 14 Jahren) in Deutschland; 27.-29. Juli 2018

Quelle: DAK/forsa

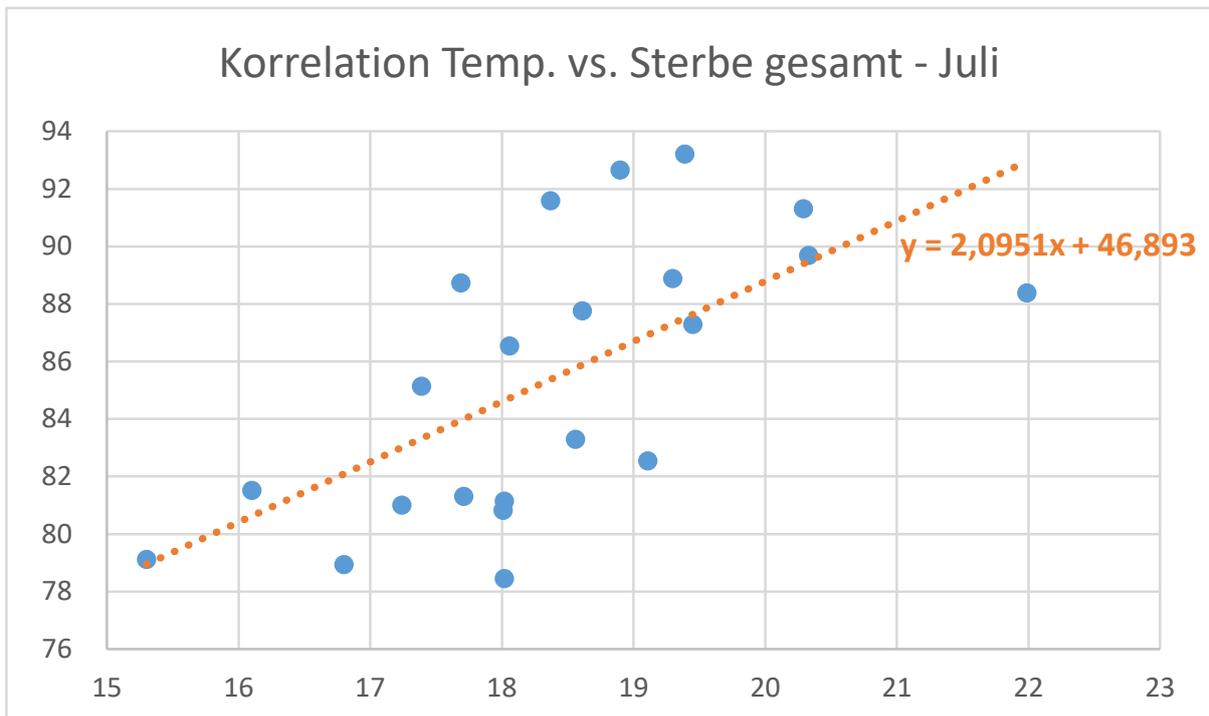
statista

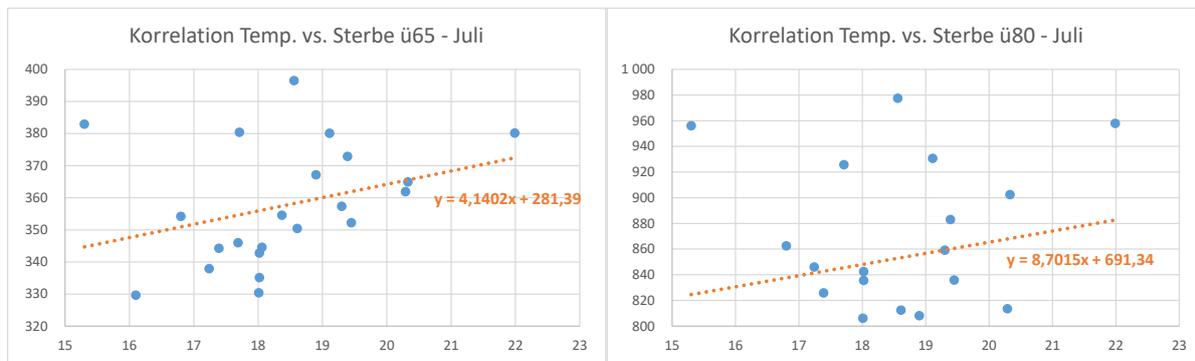
Um den Zusammenhang zwischen der Mortalität und der Temperaturentwicklung in Deutschland aufzuzeigen, wurden zum einen die monatlichen Sterbefälle als auch die mittlere monatliche Temperatur in Deutschland ausgewertet. Alle Daten sind öffentlich verfügbar. Dargestellt wird in den folgenden Abbildungen eine Zeitreihe von Januar 2000 bis September 2021. Dabei werden zum einen alle Sterbefälle sowie die Sterbefälle in den Altersgruppen über 65 Jahre und über 80 Jahre betrachtet. Zum anderen wird als direkter Vergleich sowohl die Temperatur als auch die Anzahl der Sterbefälle aus dem Vorjahr als Vergleichswert im Diagramm aufgenommen. Dadurch kann man den direkten Einfluss der Temperaturveränderung auf die Veränderung der Anzahl der Sterbefälle erkennen.





Auffällig sind die Hitzewellen in den Jahren 2003, 2006, 2010, 2013, 2015 und 2018. In den Sommermonaten ist die mittlere Temperatur gegenüber dem Vorjahr z. T. deutlich gestiegen. Zudem beobachtet man in diesen Jahren auch einen deutlichen Anstieg der Sterbefälle gegenüber dem Vorjahr. Um den Zusammenhang zwischen Sterbefällen und Temperatur noch besser zu verdeutlichen, wird im Folgenden eine Korrelation zwischen Temperatur und Sterbefällen betrachtet. Dabei wird die Inzidenz der Todesfälle (bezogen auf 100.000 Einwohner) ermittelt.





Exemplarisch wird hier der Zusammenhang zwischen Sterbefällen und mittlerer Temperatur im Monat Juli gezeigt. Offensichtlich ist die Abhängigkeit der Sterblichkeit von der Temperatur bei den höheren Altern ausgeprägter (s. Steigungsfaktor der Trendlinie).

Eine deutlich wissenschaftlichere Untersuchung der hitzebedingten Todesfälle in Deutschland liefert die gemeinsame Studie des RKI und der Charité aus dem Jahr 2019 (Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015, an der Heiden et al.). Hier werden die wöchentlichen Sterblichkeitsdaten des statistischen Bundesamtes von 2001 bis 2015 betrachtet. Um die Temperaturabhängigkeit der Sterblichkeit zu untersuchen, hat sich die Wochenmitteltemperatur (Wochenmittel der Lufttemperatur) als geeignetster Temperaturindex herausgestellt. Wie oben beschrieben wird der Zusammenhang zwischen meteorologischen Daten und Sterblichkeit über ein GAM modelliert. Dabei ergeben sich folgende Ergebnisse (getrennt für unterschiedliche Altersgruppen und Regionen):

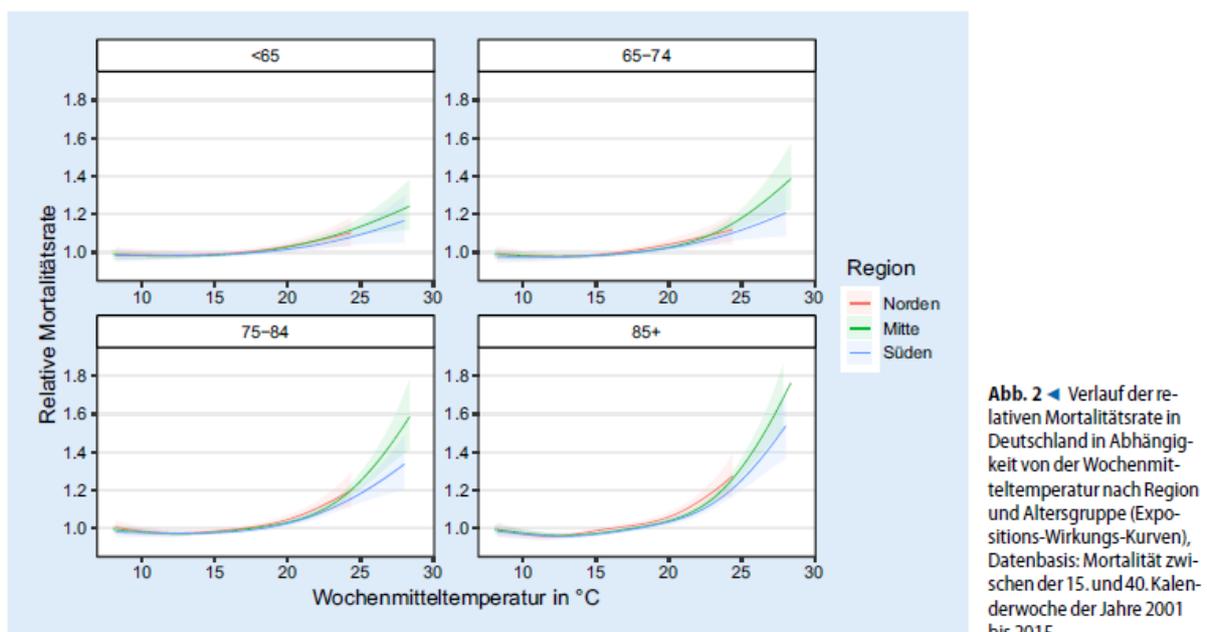


Abb. 2 ◀ Verlauf der relativen Mortalitätsrate in Deutschland in Abhängigkeit von der Wochenmitteltemperatur nach Region und Altersgruppe (Expositions-Wirkungs-Kurven), Datenbasis: Mortalität zwischen der 15. und 40. Kalenderwoche der Jahre 2001 bis 2015

Insbesondere in den Altersgruppen 75-84 und 85+ zeigt sich eine deutlich steigende Mortalitätsrate ab einer Wochenmitteltemperatur über 20°C. Dabei werden aber auch regionale Unterschiede sichtbar, da im Norden Wochenmitteltemperaturen über 25°C kaum auftreten. Daher ist die Risikoexposition im Norden entsprechend geringer als in der Mitte und im Süden von Deutschland. Dies zeigt sich

demzufolge auch bei dem Verlauf der hitzebedingten Sterbefälle pro 100.000 Einwohnern. In der Abb. 1 werden die mittels des beschriebenen Modells erwarteten Hitzetoten pro Region in den Jahren 2001 bis 2015 dargestellt. Wie schon in den Grafiken oben zeigen sich deutliche Sterblichkeitsauschläge in den Jahren 2003, 2006, 2010, 2013 und 2015.

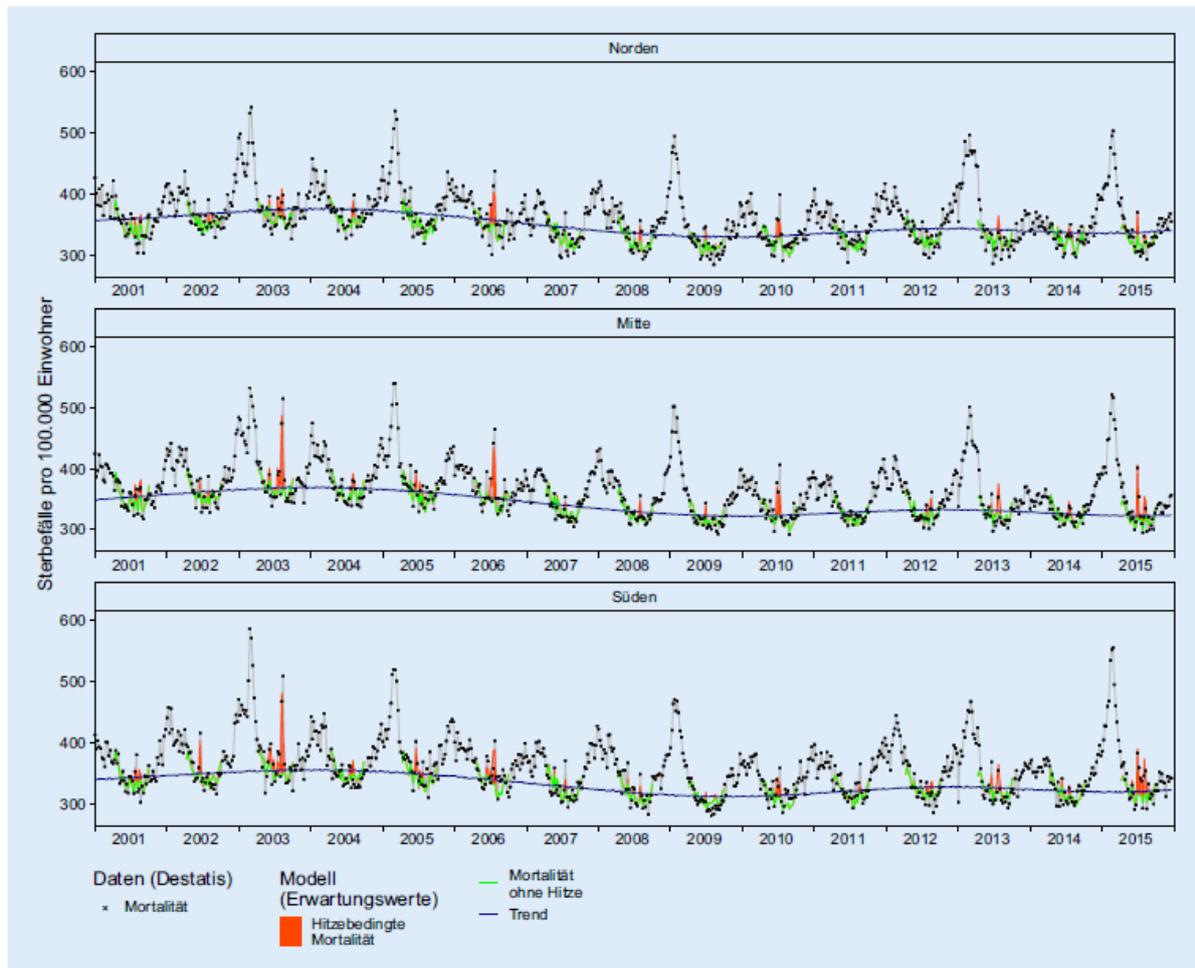


Abb. 1 ▲ Verlauf der wöchentlichen Mortalität in Deutschland für die Altersgruppe 85+ nach Region in den Jahren 2001–2015 (Destatis-Daten, mit grauer Linie verbunden). Modellierung der Sommerwochen (15. bis 40. Kalenderwoche) mit dem generalisierten additiven Modell unter Einbeziehung der Wochenmitteltemperatur.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

Insgesamt wurden auf Basis des Modells für die Jahre 2003, 2006, 2010, 2013 und 2015 deutlich mehr Hitzetote ermittelt als in den übrigen Jahren des Beobachtungszeitraums (vgl. Tab.1).

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

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

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

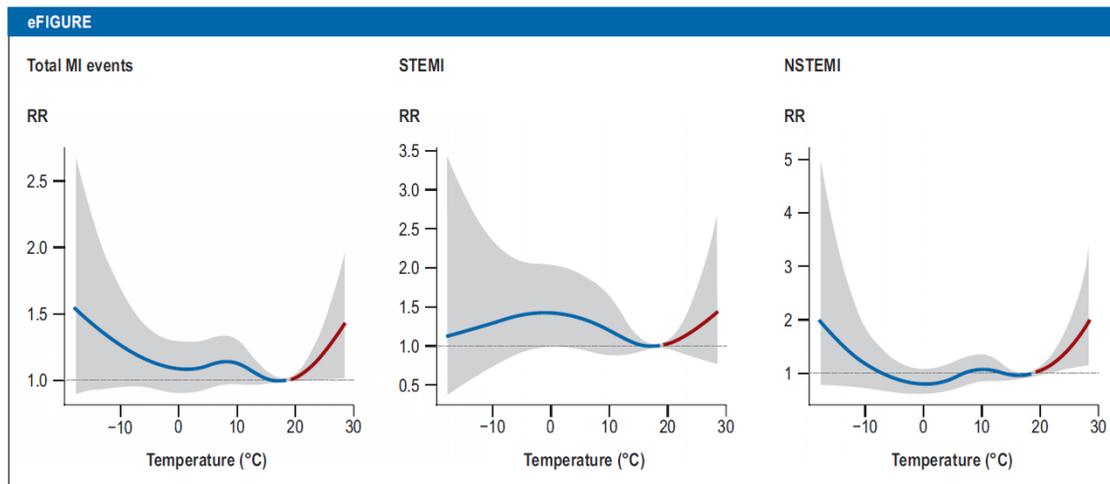
Als Ursachen für einen hitzebedingten Tod wurden Herzinfarkte, andere Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Nierenversagen, Atemwegserkrankungen, Schlaganfälle und Stoffwechselstörungen ermittelt.

Damit zeigt auch diese Auswertung, dass insbesondere ältere Personen und Personen mit Vorerkrankungen im Hinblick auf die Auswirkung von Hitzeextremen und Hitzewellen besonders gefährdet sind.

2.1.5. *Hitzebedingte Auswirkungen auf Morbidität*

Wie oben beschrieben führen Hitzeextrema und Hitzewellen (genauso wie starke Kälte) zu einer starken Beanspruchung des menschlichen Organismus. Daher steigt bei Hitzeextrema neben dem Sterblichkeitsrisiko auch das Risiko schwerer Erkrankungen. Exemplarisch soll dies an der hitzebedingten Zunahme von Herzinfarkten aufgezeigt werden. Hierzu gibt es eine Ausarbeitung aus dem Jahr 2019 (Projection of Temperature-Related Myocardial Infarction in Augsburg, Germany, K. Chen et al.), in der der Zusammenhang von Temperatur und Myokardinfarkten (MI) in der Stadt Augsburg untersucht wurde. Dazu wurden alle Herzinfarkt-Fälle in Augsburg und Umgebung in der Altersgruppe 25 bis 74 Jahre (~ 400.000 Einwohner) im Zeitraum vom 01.01.2001 bis 31.12.2014 betrachtet. Dabei wurde zwischen verschiedenen Typen von MI unterschieden, nämlich STEMI (ST-Hebungsinfarkt) und NSTEMI (kein ST-Hebungsinfarkt), weil die Temperaturabhängigkeit bei den beiden Subtypen unterschiedlich ausgeprägt ist. Analog zum oben beschriebenen Vorgehen bei der Ermittlung des relativen Risikos (RR) der Sterblichkeit von der Temperatur wurde hier der Zusammenhang zwischen der täglichen

Durchschnittstemperatur und der täglichen Anzahl an MI mittels Zeitreihenanalyse gemäß DLNM modelliert. Dabei ergaben sich folgende Ergebnisse:

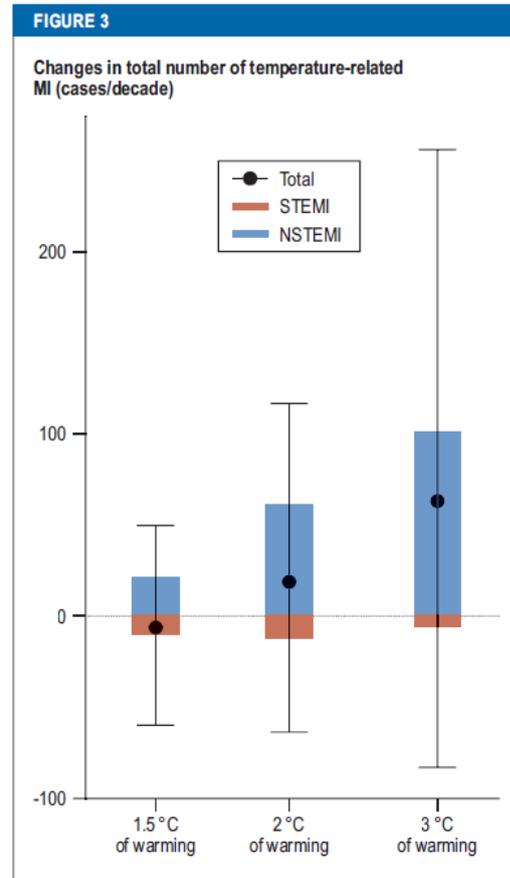
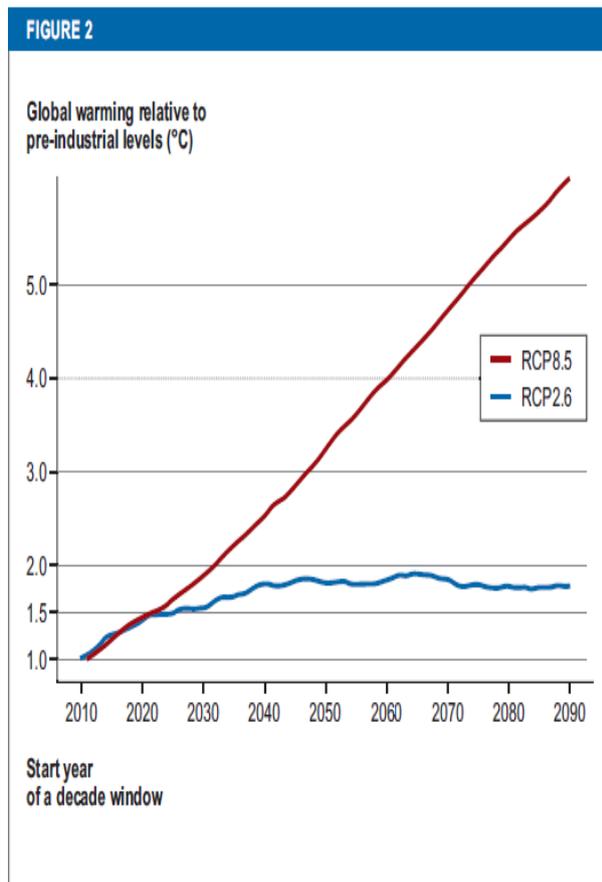


Cumulative exposure–response functions between air temperature and myocardial infarction (with 95% confidence intervals) in Augsburg, Germany in the period 2001 to 2014. The exposure–response functions were obtained from Chen et al. (2019) (15). The red lines represent the effect of heat (temperature above 18.4 °C), while the blue lines show the effect of cold (temperature below 18.4 °C).

Offensichtlich ergibt sich ein (mehr oder weniger ausgeprägter) U-förmiger Zusammenhang zwischen der Durchschnittstemperatur und dem Herzinfarktisiko (ERF, exposure-response-function). Bei einer Temperatur von 18,4°C (minimale MI-Temperatur) ist das Herzinfarktisiko am geringsten. Oberhalb der minimalen MI-Temperatur, aber auch unterhalb dieser Temperatur (insbesondere bei sehr niedrigen Temperaturen) steigt das Risiko, einen MI zu erleiden, deutlich an.

Interessant ist, dass Zusatzauswertungen gezeigt haben, dass sich der Hitzeeffekt in den Jahren 2001 – 2014 gegenüber dem Zeitraum 1987 – 2000 z. T. deutlich erhöht hat.

Um die zukünftige Entwicklung der temperaturbedingten Herzinfarkte zu simulieren, wurden Temperatur-Projektionen für zwei unterschiedliche Klima-Szenarien (RCP2.6 und RCP8.5) in Abhängigkeit unterschiedlicher Emissions-Szenarien betrachtet. Wie oben beschrieben handelt es sich bei dem RCP2.6 um ein Szenario im Einklang mit dem Pariser Klimaabkommen, bei dem die globale Erwärmung unter 2°C bleibt. Das Szenario RCP8.5 hingegen stellt das worst-case-Szenario dar mit einer globalen Erwärmung im Jahr 2100 von mehr als 3°C. Die Temperatur-Projektionen bis zum Jahr 2099 wurden mittels vier globalen Klimamodellen (GCMs), die in dem Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project Phase 2b (ISIMIP2b) enthalten sind, entnommen und beziehen sich räumlich auf das Zentrum von Augsburg.



Auf Basis der Temperatur-Projektionen wurden unter Nutzung der ERF Abschätzungen für die zukünftige Anzahl an MI in den nächsten Jahrzehnten durchgeführt und Abweichungen von der Baseline (MI-Fälle aus dem Beobachtungszeitraum 2001-2014) abgeleitet. Um die Unsicherheiten in der ERF und in den vier unterschiedlichen Klimamodellen aufzuzeigen, wurden mittels Monte-Carlo-Simulation 5.000 unterschiedliche Szenarien erzeugt und die Auswirkungen auf die MI-Fälle ermittelt. Dabei geht man weder von einer Änderung der Bevölkerungsstruktur noch von einem veränderten Anpassungsniveau an Hitzeextreme aus.

Wie man in Figure 3 erkennen kann, hängt die zukünftige Entwicklung der MI-Fälle deutlich von dem Niveau der globalen Erwärmung ab. Während sich in einem Szenario mit einer globalen Erwärmung von 1,5°C der Anstieg der hitzebedingten MI-Fälle und der Rückgang der Kälte-bedingten MI-Fälle (aufgrund milderer Winter) nahezu saldieren, führt der hitzebedingte Anstieg der MI-Fälle in den Szenarien mit einer globalen Erwärmung von mehr als 2°C zu einem deutlichen Anstieg der MI-Fälle (Anstieg um rd. 0,7% bei einer globalen Erwärmung von 3°C). Offensichtlich gibt es Unterschiede bei STEMI und NSTEMI. Da die NSTEMI v. a. bei Kälte auftreten, reduzieren sich diese Fälle, während die STEMI-Fälle hitzebedingt deutlich zunehmen.

TABLE 2

Changes in attributable number and fraction (95% eCI)* of temperature-related MI cases per decade in Augsburg assuming global warming of 1.5 °C, 2 °C, and 3 °C

Global warming	Attributable number			Attributable fraction (%)		
	Heat	Cold	Net change	Heat	Cold	Net change
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]

*The 95% eCI (empirical confidence interval) was obtained by considering the uncertainty of concentration–response function using 5000 Monte Carlo simulations and four global climate models.

Explanation: Global warming of 2 °C, for example, is associated with 54 additional heat-related events and 36 fewer cold-related events, resulting in a net change of 18 additional temperature-related events per decade. Thus, 0.2% of all MI cases can be attributed to global warming.

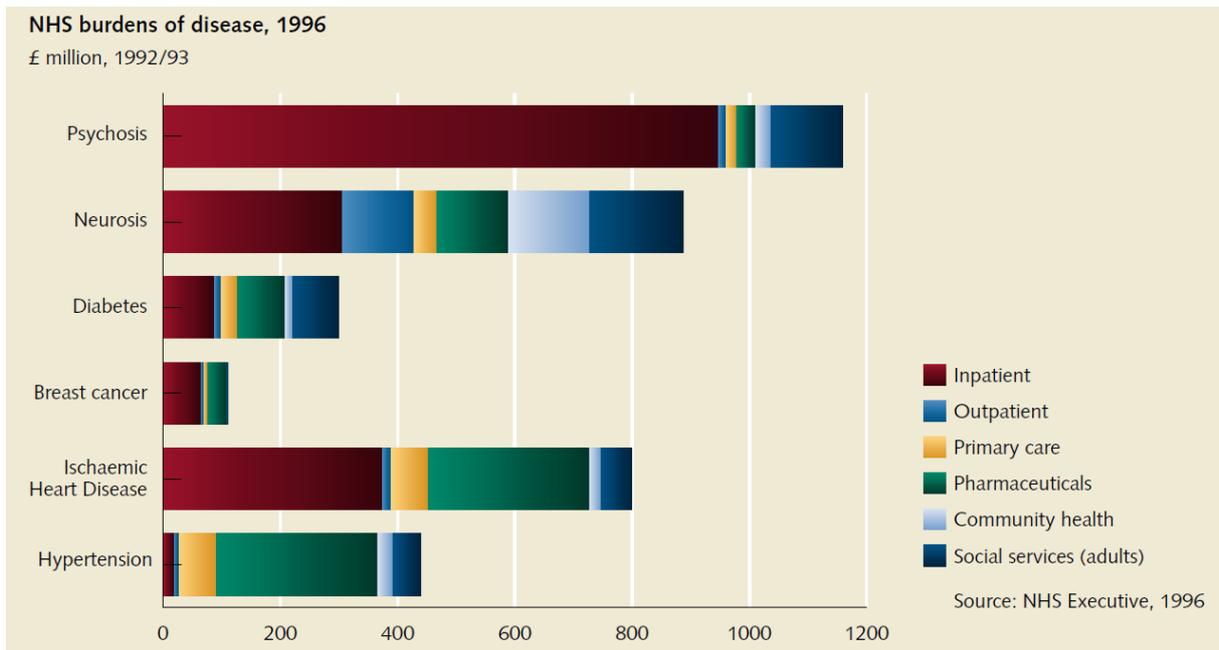
In Table 2 kann man die Unsicherheit in den Berechnungen erkennen. Z. B. liegt bei einer globalen Erwärmung von 3°C das 95%-Konfidenzintervall für die saldierte prozentuale Veränderung der MI-Fälle zwischen -0,9% und 2,7% (absolute Netto-Veränderung liegt zwischen -83 Fällen und +257 Fällen).

Aufgrund der fehlenden demografischen Komponente des Modells wird der Temperatur-Effekt auf die zukünftige Anzahl der MI-Fälle unterschätzt. Andererseits können Anpassungseffekte, der Einsatz besserer Frühwarnsysteme oder von Präventionsmaßnahmen auch positive Effekte auf die zukünftige Anzahl der MI-Fälle haben.

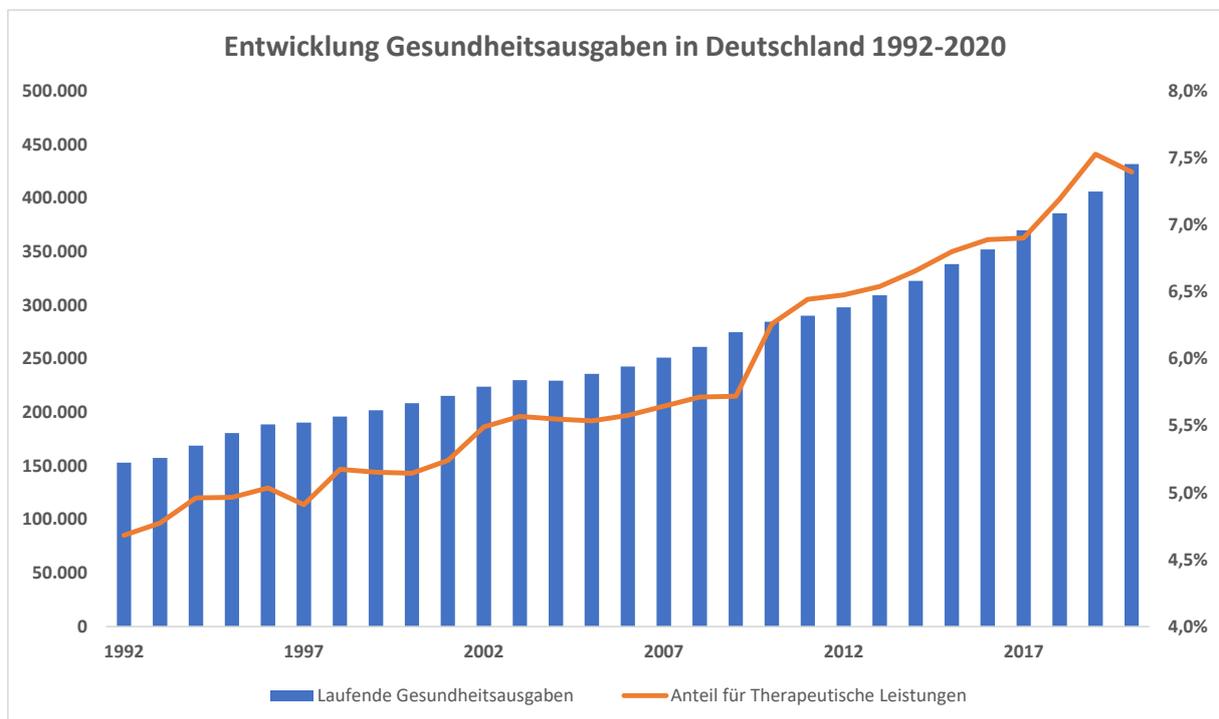
2.1.6. Hitzebedingte Auswirkungen auf psychische Krankheiten

In den letzten Jahren wurden auch die Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und der mentalen Gesundheit untersucht. Gemäß Definition der WHO ist die mentale Gesundheit „der Zustand des Wohlbefindens eines Menschen, in dem jeder Einzelne seine Fähigkeiten erkennt, mit dem Alltagsstress zurechtkommt, produktiv arbeiten und aktiv seinen Beitrag für die Gesellschaft leisten kann“. Falls das nicht gegeben ist, so entstehen sowohl persönliche als auch ökonomische, gesamtgesellschaftliche Probleme. Die Kosten, die für die Behandlung psychischer Erkrankungen anfallen, sind aufgrund der langen Behandlungsdauer sehr hoch. Die folgende Grafik zeigt eine NHS-Studie¹⁶, wonach die Kosten psychischer Erkrankungen höher sind als die anderer chronischer Krankheiten (wie z. B. Brustkrebs oder Diabetes).

¹⁶ NHS = National Health Service, staatliches Gesundheitssystem in Großbritannien und Nordirland



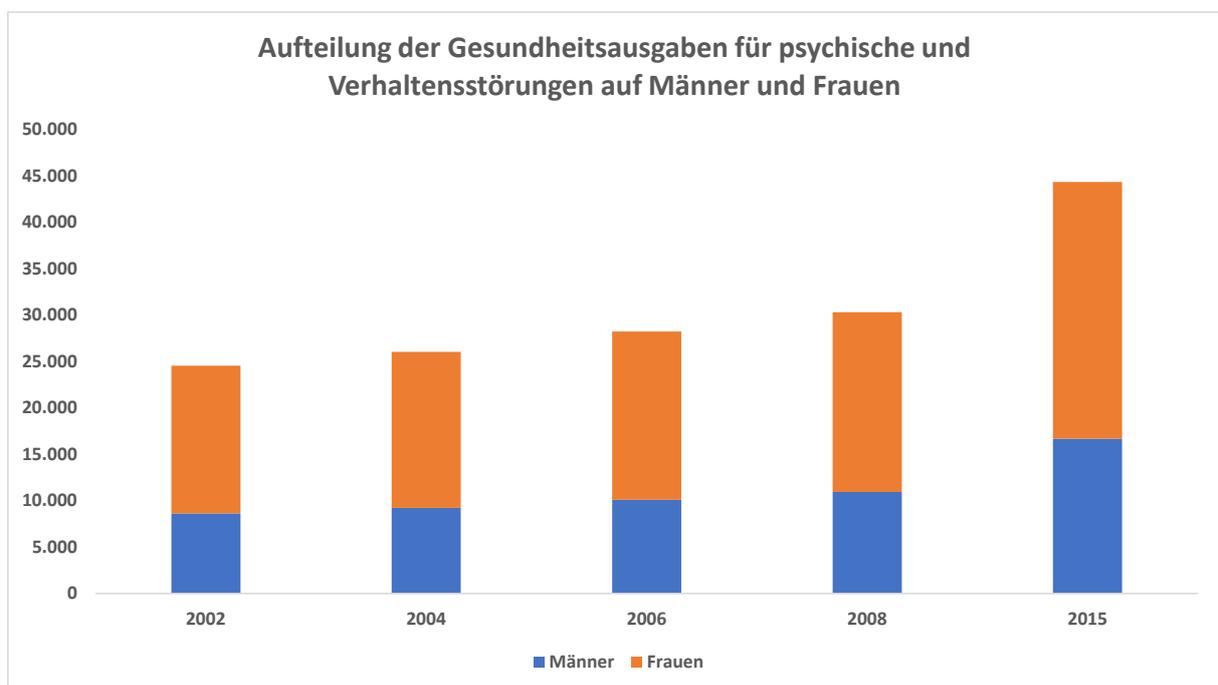
Die Bedeutung der Ausgaben im deutschen Gesundheitswesen für psychische Erkrankungen wird anhand der folgenden Grafik (Quelle: gbe-bund.de) verdeutlicht:



Wie man erkennen kann, sind in den letzten 30 Jahren die Ausgaben für therapeutische Behandlungen (hierunter fallen allerdings nicht nur psychotherapeutische Leistungen, sondern auch Physiotherapie sowie von Heilpraktikern, Logopäden und Chiropraktikern erbrachte Leistungen) stärker gestiegen als die allgemeinen laufenden Gesundheitsausgaben. Dass aber auch die Ausgaben für psychische und Verhaltensstörungen in den letzten zwei Jahrzehnten überdurchschnittlich angestiegen sind, zeigt die folgende Grafik (Quelle: gbe-bund.de):

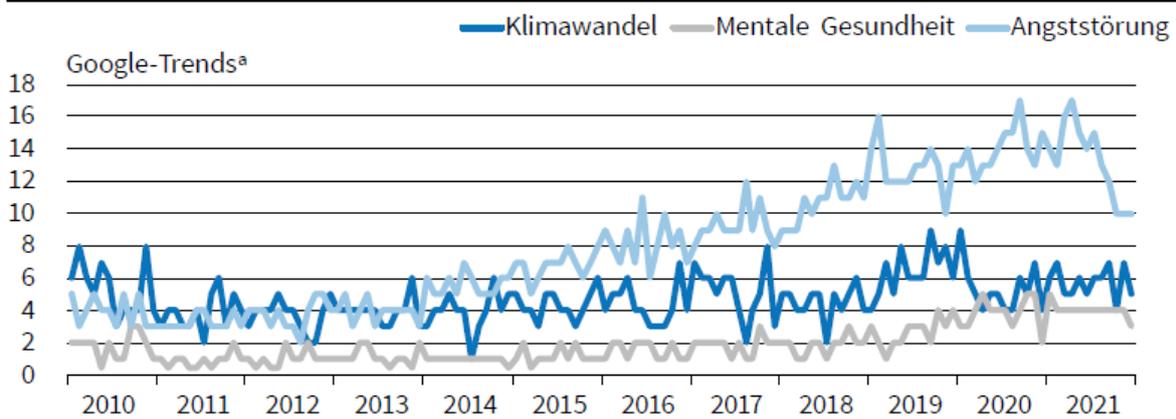


Der Anteil der Gesundheitskosten für psychische Erkrankungen und Verhaltensstörungen ist von 2002 bis 2015 um mehr als 2%-Punkte gestiegen. Überdurchschnittlich hohe Ausgabensteigerungen kann man im Bereich der affektiven Störungen (Veränderungen der Stimmungslage wie z. B. Depressionen) und der neurotischen, Belastungs- und somatoformen Störungen, zu denen auch die Angststörungen gehören, beobachten. Frauen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit, von psychischen Erkrankungen betroffen zu sein (vgl. folgende Grafik), genauso wie sozial und wirtschaftlich benachteiligte Menschen.



Generell kann man mittel- und langfristig mit Auswirkungen des Klimawandels auf die mentale Gesundheit der Bevölkerung rechnen. Das ifo-Institut hat in einer aktuellen Studie („Klimawandel und mentale Gesundheit: Korrelation versus Kausalität und die Rolle von Big Data“, 2022) Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und der mentalen Gesundheit untersucht. Dabei wurden mittels Google-Trend die Suchabfragen zu „Klimawandel“, „Mentale Gesundheit“ und „Angststörungen“ ausgewertet und anhand der Daten aus der „EM-DAT International Disaster Database“ in Beziehung zu Wetterextremen (hier: Hitzewellen) gestellt. Eine einfache Regressionsanalyse hat gezeigt, dass bei Hitzewellen die Anzahl der Suchabfragen zu Angststörungen zunimmt. Dies deckt sich mit den Beobachtungen bei der Google-Suche nach Klimawandel und mentaler Gesundheit.

Entwicklung von Google-Suchanfragen



^a Google Trends zeigen die relative Popularität einer bestimmten Suche/Abfrage. Google Trends nimmt das Suchvolumen einer bestimmten Suchanfrage (in unserer Analyse haben wir Suchanfragen zu Angststörung, Depression, Klimawandel und mentalen Gesundheit verwendet) und teilt es durch die Gesamtzahl der Suchanfragen, die in dem gegebenen Zeitraum und der geografischen Region durchgeführt wurden. Das sich daraus ergebende Verhältnis wird dann auf einer Skala von 0 – 100 skaliert.

Quelle: Berechnungen der Autorinnen.

© ifo Institut

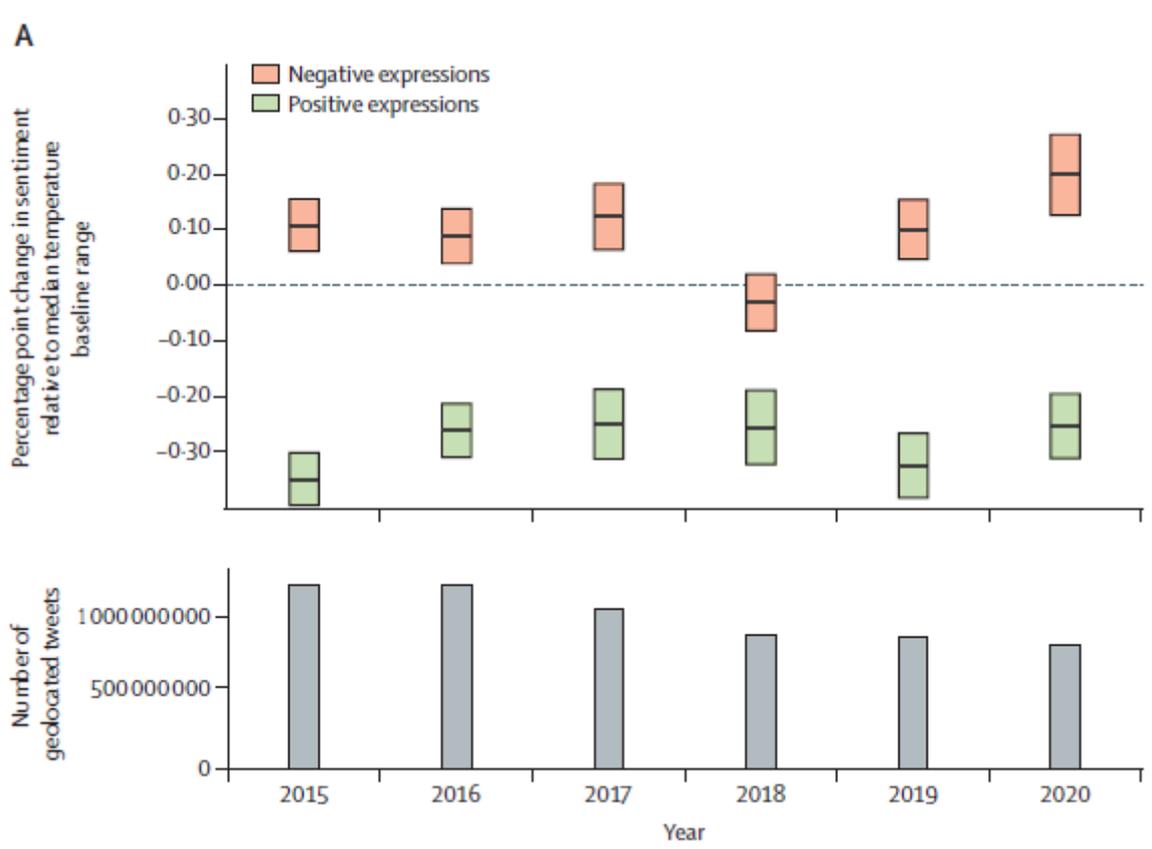
Auch wenn es sich hierbei nur um eine sehr einfache Korrelationsanalyse handelt, die noch keine genauen Wirkzusammenhänge zwischen Klimawandel und psychischen Erkrankungen aufzeigt, so handelt es sich um einen Indikator, der das Risiko zukünftig steigender Gesundheitsausgaben für psychische Probleme adressiert.

Auch im Lancet Countdown, der in seinem Report 2021 erstmals einen Indikator für den Zusammenhang zwischen Klimawandel und mentaler Gesundheit aufgenommen hat, werden die psychischen Auswirkungen von Hitzewellen auf die Stimmungslage der Menschen gemessen an ihrem Verhalten in den sozialen Medien betrachtet. Genauer wird folgendes Verfahren beschrieben:

Insgesamt wurden weltweit 6,14 Mrd. geografisch zuordenbare Tweets zwischen 2015 und 2020 von durchschnittlich täglich 900.000 aktiven Twitter-Nutzern betrachtet und im Hinblick auf ihre Stimmungslage bewertet.

Die Klassifizierung in positive bzw. negative Stimmung der Posts wurde mittels des Klassifizierungstools Linguistic Inquiry Word Count (LIWC), der dies für insgesamt elf Sprachen ermöglicht, durchgeführt. Es erfolgte eine Codierung auf 0, falls keine Stimmungslage feststellbar bzw. auf 1, falls eine positive oder negative Bewertung möglich ist. Für jeden Tag wurde damit die durchschnittliche positive und negative

Stimmung pro User ermittelbar und über Regionen aggregiert. Diese wurden nun in Beziehung zu den entsprechenden täglichen Wetterdaten (Temperatur, Niederschläge, Bewölkung, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit) für 2015 – 2020 gestellt. Dabei wurde eine Schätzung des Effekts der Hitzewelle auf positive und negative Stimmung mittels einer Regression (Kleinste-Quadrate-Schätzung) durchgeführt.



Bei Hitzewellen reduziert sich die Anzahl der positiven Äußerungen, während sich die Anzahl der negativen Tweets erhöht. Auch dieses Ergebnis legt die Vermutung nahe, ähnlich wie bei der Analyse der google-Suchabfragen, dass es Zusammenhänge zwischen Wetterextremen und der mentalen Gesundheit gibt. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass in dieser Auswertung die weniger entwickelten Länder unterrepräsentiert sind, und das Ergebnis daher verfälscht sein könnte.

Es gibt viele weitere internationale Studien, die sich mit der Korrelation zwischen Umgebungstemperatur bzw. Hitzewellen und den Krankenhaus-Einweisungen wegen psychischer Störungen, höherer Selbstmordraten und dem Anstieg von Körperverletzungen bis hin zum Mord beschäftigen. Erwähnt sein hier die Studie von Burke et. al. (2018), die sich mit dem Anstieg der Selbstmordrate in den USA und Mexiko bei heißen Temperaturen beschäftigt. In der Studie wird dargestellt, dass die Selbstmordrate in US-Bezirken um 0,7% und in mexikanischen Regionen um 2,1% steigt, wenn sich die monatliche Durchschnittstemperatur um 1°C erhöht. In der Studie wird explizit darauf hingewiesen, dass es neben der Temperatur auch noch viele andere Einflussgrößen auf die Suizidrate gibt, und dass diese Effekte für eine sinnvolle Aussage zur Temperaturabhängigkeit eliminiert werden müssen.

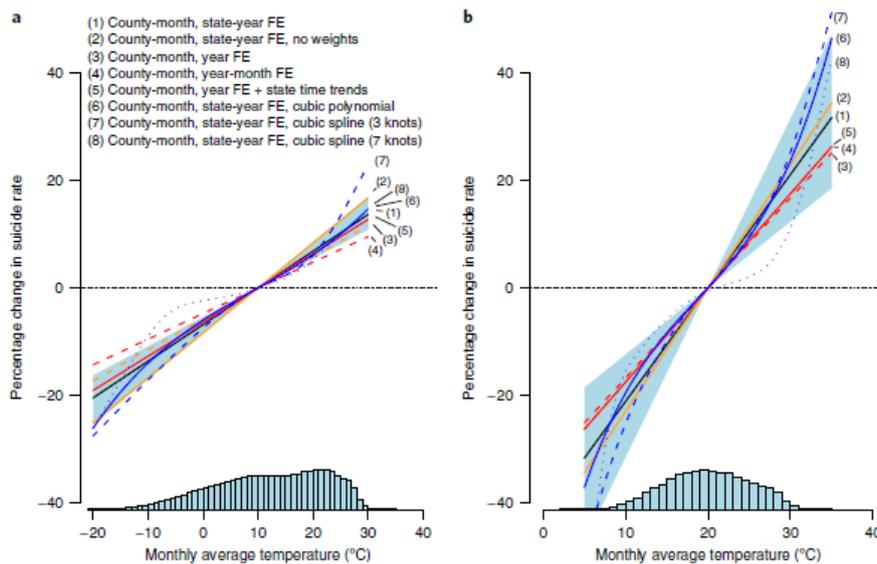


Fig. 1 | Effects of temperature on suicide rate. a, b. The lines show the estimated relationship between monthly temperature and monthly suicide rate in the United States (**a**; 1968–2004) or Mexico (**b**; 1990–2010), under different specifications of the fixed effects (FE) and increasingly flexible polynomials or splines as described in the legend. The blue shaded areas are the bootstrapped 95% CI on Model 1 for each country. The histograms at the bottom display the distribution of monthly temperatures in each sample. Fixed effects in Mexico are as in the United States, except with municipality and state-month fixed effects in place of county-month fixed effects.

Neben Hitzewellen können weitere direkte Auswirkungen des Klimawandels eine wichtige Rolle für die Psyche der Bevölkerung haben (z. B. Luftverschmutzung, Naturkatastrophen wie Wirbelstürme oder Waldbrände, Dürren mit Folgen für die Sicherung der Lebensgrundlagen).

Alle diese Ereignisse, die durch den Klimawandel zukünftig mit großer Wahrscheinlichkeit deutlich zunehmen werden, können zu einer Verschlimmerung bestehender bzw. dem erstmaligen Auftreten psychischer Probleme führen. Es entstehen aber auch neue psychische Störungen wie Öko-Anxiety oder Öko-Paralysis¹⁷, die direkt durch Umwelt- und Klimaveränderungen ausgelöst werden, und zu denen aktuell noch sehr wenig bekannt ist.

Zur Verbesserung bzw. dem Erhalt der mentalen Gesundheit der Bevölkerung (insb. in vulnerablen Gruppen) sind neben Klimaschutzmaßnahmen auch Verhaltensänderungen (z. B. in Bezug auf Ernährung und Mobilität) erforderlich. Hier spielen Aufklärung und Präventionsmaßnahmen eine wichtige Rolle.

2.1.7. Hitzebedingte Arbeitsunfähigkeit

Eine weitere (indirekte) Auswirkung der globalen Erwärmung und von daraus resultierenden Hitzeereignissen (Hitzeextrema, Hitzewellen) ist die Beeinträchtigung

¹⁷ Öko-Angst (kurz für ökologische Angst und auch bekannt als Öko-Stress oder Klima-Angst) wurde definiert als "eine chronische Angst vor dem ökologischen Untergang". Öko-Angst ist ein unangenehmes Gefühl, das aber auch adaptiv sein kann und zu nützlichen Verhaltensweisen wie dem Sammeln relevanter Informationen motiviert. Sie kann sich aber auch als Konfliktvermeidung manifestieren oder sogar lähmend wirken. Einige Menschen haben berichtet, dass sie aufgrund des Klimawandels so viel Angst vor der Zukunft haben, dass sie sich entscheiden, keine Kinder zu bekommen. Die Aufmerksamkeit für die Öko-Angst stieg nach 2017 rapide an, insbesondere seit Ende 2018, als Greta Thunberg öffentlich über ihre Öko-Angst sprach.

der Arbeitsfähigkeit / Arbeitsleistung der Menschen. Im Lancet Countdown 2021 wird aufgezeigt, dass im Jahr 2020 weltweit 295 Mrd. Arbeitsstunden aufgrund extremer Hitze verloren gegangen sind. Dies sind 88 Arbeitsstunden pro Erwerbstätigen. Natürlich ergeben sich unterschiedlich starke Auswirkungen in verschiedenen Ländern. Dies hängt sowohl mit der Art der Tätigkeiten als auch mit der Bevölkerungsstruktur zusammen. Im Annex des Lancet Countdown wird die zugehörige Methodik erläutert, wie der jährliche Arbeitsausfall sowohl auf Länder als auch auf Sektoren heruntergebrochen werden kann.

Eine globale Verteilung der verlorenen Arbeitsstunden pro Sektor in den Jahren 1990 bis 2020 zeigt die folgende Grafik. Aufgrund der Schwere der körperlichen Arbeit sowie dem Anteil der dort arbeitenden Bevölkerung, weist der Landwirtschaftssektor den höchsten Arbeitsausfall auf. Dies kann in der Folge auch zu Auswirkungen in der Lebensmittelproduktion führen und damit auch auf die Preisentwicklung bei Nahrungsmitteln. Allerdings stagnieren die ausgefallenen Arbeitsstunden in den letzten Jahren, da sich die Anzahl der Erwerbstätigen in der Landwirtschaft in vielen Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen reduziert hat. In allen anderen Sektoren (v. a. im Dienstleistungssektor) ist dagegen ein Anstieg des jährlichen Arbeitsausfalls zu beobachten. Im Jahr 2020 spielen zusätzlich die Lockdown-Maßnahmen aufgrund von Covid-19 eine Rolle, die insb. im Dienstleistungssektor, im Baugewerbe und im verarbeitenden Gewerbe zu Arbeitsausfällen geführt haben.

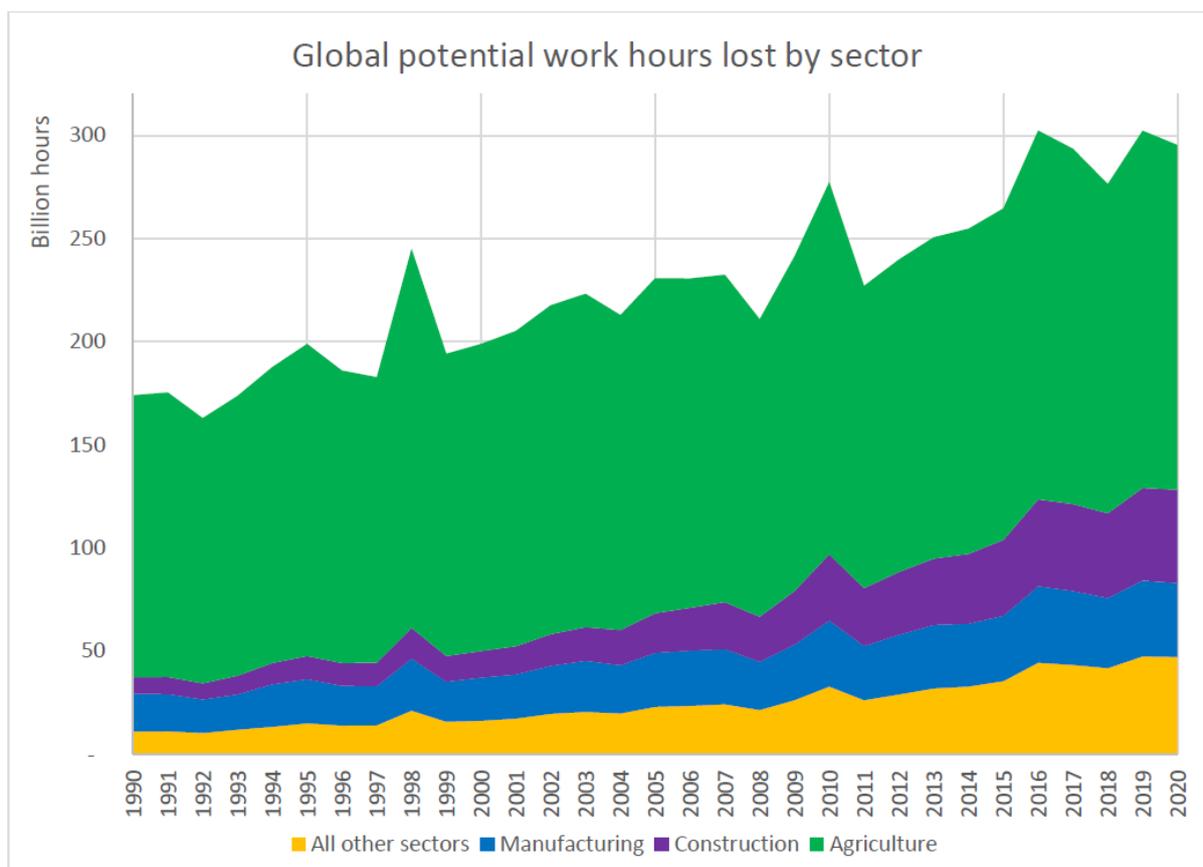


Figure 8. Global potential work hours lost (billions) due to heat by employment sector, 1990-2020.

Eine Frage ist nun, wie groß der Einfluss des Klimawandels auf die Entwicklung des Arbeitsausfalls, neben den Entwicklungen der Bevölkerungszahl und dem Anteil der Erwerbstätigen an den einzelnen Sektoren ist. Hierzu wurden die einzelnen Einflussfaktoren ceteris paribus ausgetauscht. Betrachtet man die Bevölkerungs- und Erwerbstätigenverteilung des Jahres 1990 unverändert in allen Jahren, so ergibt sich der singuläre Effekt aus dem Klimawandel. Durch sukzessive Hinzunahme der Bevölkerungsveränderung und im letzten Schritt der Erwerbstätigenverteilung ergibt sich die Gesamtwirkung. Die nachfolgende Grafik zeigt, dass der Klimaeffekt die Arbeitsausfälle um rd. 12% pro Jahrzehnt erhöht. Der Bevölkerungszuwachs führt zu einem weiteren Anstieg der Arbeitsausfälle. Durch die geänderte Verteilung der Erwerbstätigen auf die Sektoren ergibt sich ein dämpfender Effekt.

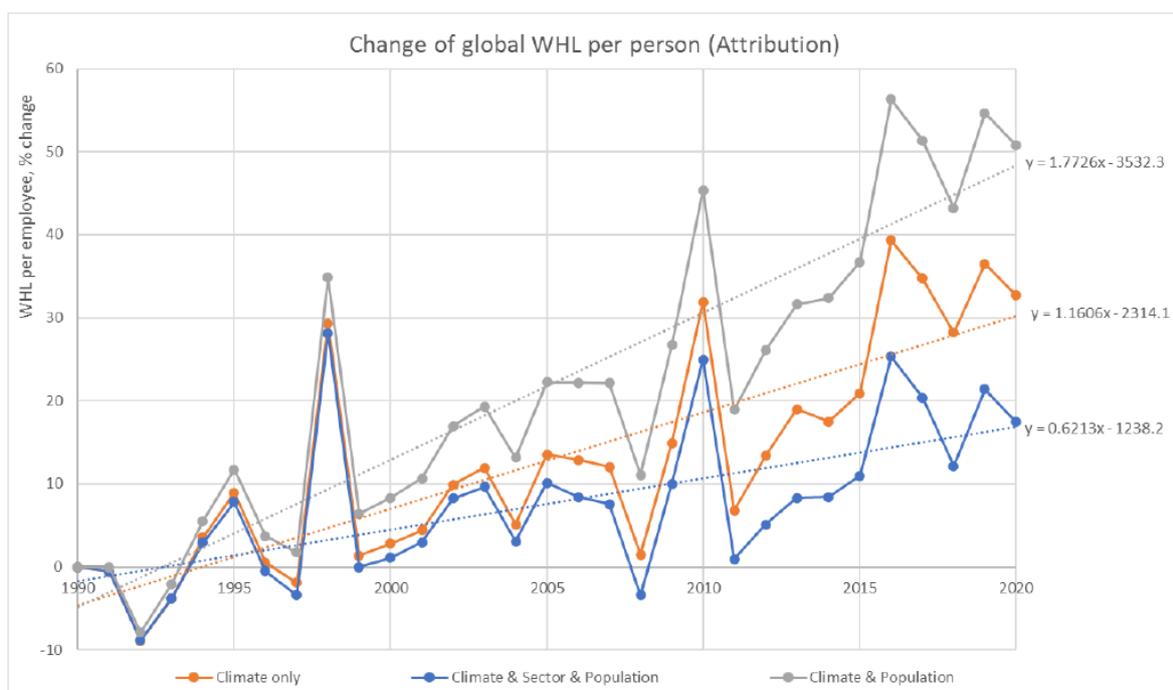


Figure 10. Global changes of work hours lost per employed person, 1990-2020.

Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Sektoren und der klimatischen Bedingungen in den verschiedenen Ländern weltweit ergeben sich natürlich auch Länder-spezifische Unterschiede. Ein typisches Unterscheidungsmerkmal stellt der HDI (human development-index der UN) dar. Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung des durchschnittlichen täglichen Arbeitsausfalls pro Person von 1990 bis 2020 abhängig vom HDI. Je geringer der HDI, desto größer ist der Arbeitsausfall. Dies hängt mit der Verteilung der Erwerbstätigen auf die Sektoren in den einzelnen Ländern zusammen. Insbesondere Länder mit geringem oder mittlerem HDI weisen einen überdurchschnittlich hohen Landwirtschaftsanteil auf. Da dieser besonders stark von der klimatischen Entwicklung betroffen ist, ist der Arbeitsausfall hier auch besonders groß.

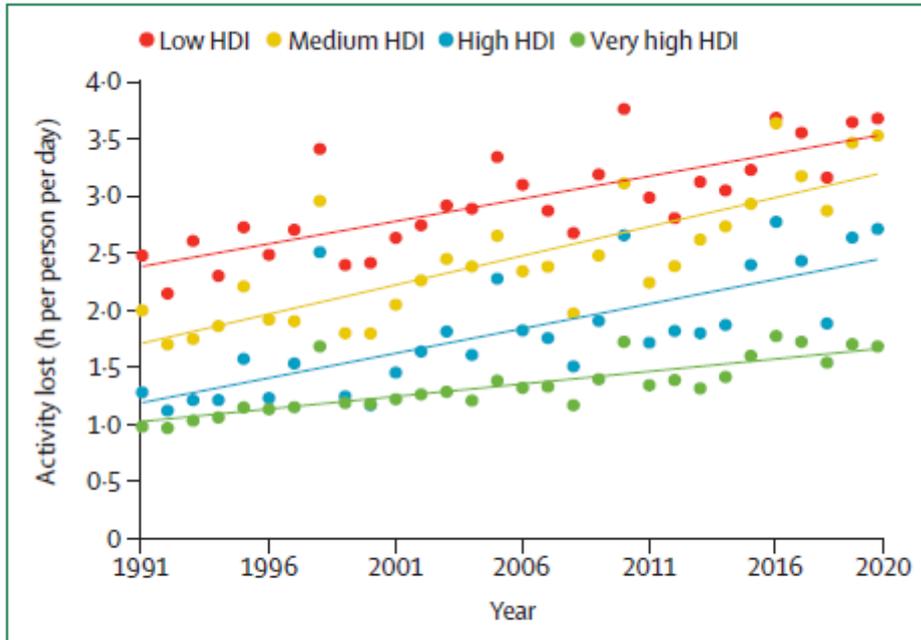
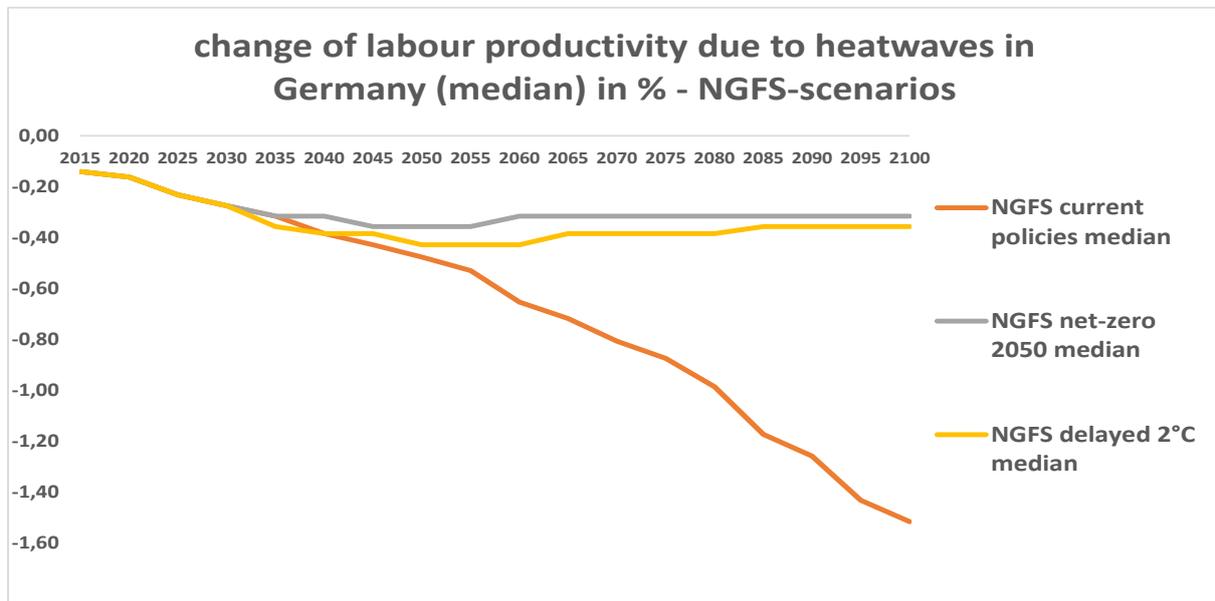


Figure 2: Average hours of safe physical activity lost per person due to high wet bulb globe temperature by 2019 HDI country group (1980-2020)
 HDI=human development index.

Dass aber auch Länder mit sehr hohem HDI von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sind, zeigt die Studie „Projected Impact of Heat on Mortality and Labour Productivity under Climate Change in Switzerland“, in der die Auswirkung der globalen Erwärmung auf den Arbeitsausfall in der Schweiz für unterschiedliche RCP-Szenarien dargestellt wird. Dabei wird der Arbeitsausfall in einen ökonomischen Verlust umgerechnet, indem die ausgefallenen Arbeitsstunden mit dem durchschnittlichen Stundenlohn multipliziert werden. Im Jahr 2020 ergab sich ein geschätzter Produktivitätsverlust i. H. v. 413 Mio. CHF. Bis zum Jahr 2050 steigt dieser Verlust nur um rd. 17% im RCP2.6-Szenario, jedoch um 58% auf 648 Mio. CHF im RCP8.5-Szenario. In diesen Werten sind hohe Unsicherheiten enthalten. Beispielsweise liegt das 95%-Quantil im RCP8.5-Szenario im Jahr 2050 bei 1.629 Mio. CHF, also fast dreimal so hoch wie der Mittelwert; das 5%-Quantil liegt entsprechend bei 194 Mio. CHF.

Die mittleren Kosten im RCP8.5-Szenario entsprechen ungefähr 0,17% der gesamten Jahresgehaltssumme, jedoch unterschiedlich auf die verschiedenen Erwerbstätigengruppen verteilt. Bei Erwerbstätigen mit geringer physischer Aktivität beträgt der Verlust etwa 0,14%, bei Arbeitnehmern mit hoher Aktivität 0,35%. Trotzdem entfallen in allen Jahren und allen Szenarien zwischen 50 und 70% des Verlustes auf Erwerbstätige mit geringer körperlicher Aktivität, da etwa 2/3 der Arbeitnehmer dieser Gruppe angehören. 20 bis 35% des Verlustes entfallen auf die Gruppe der Arbeitnehmer mit hoher körperlicher Aktivität, obwohl nur 10% der Arbeitnehmer dieser Kategorie angehören. Auch daran erkennt man, dass diese Gruppe prozentual wesentlich stärker betroffen ist.

Die Ergebnisse aus der Schweiz sollten sich grundsätzlich auf Deutschland übertragen lassen. Der „Climate Impact Explorer“¹⁸ zeigt die Veränderung der Arbeitsproduktivität in Deutschland unter verschiedenen Klimawandel-Szenarien. Angegeben ist der prozentuale Rückgang der Effizienz während der regulären Arbeitszeit unter heißen und feuchten Klimabedingungen, der auf die verringerte Fähigkeit des menschlichen Körpers, körperliche Arbeit zu verrichten, zurückzuführen ist. Die nach der Bevölkerung oder dem BIP gewichteten Projektionen wurden unter der Annahme berechnet, dass sowohl die Größe als auch die Verteilung dieser beiden Parameter ab 2005 konstant bleiben würden.



2.2. Zunahme von Infektionskrankheiten

Die Veränderung der klimatischen Bedingungen, d. h. Luft- und Wassertemperatur sowie Niederschläge, können die Lebensbedingungen von Viren und Bakterien sowie deren Überträgern (Vektoren wie Insekten und Nagetiere) erheblich beeinflussen. Aufgrund der Globalisierung (Tourismus, Migration, Warentransport) können sich die Krankheitserreger weltweit ausbreiten, wodurch eine eingeschränkte Betrachtung der Situation in Deutschland nicht ausreicht.

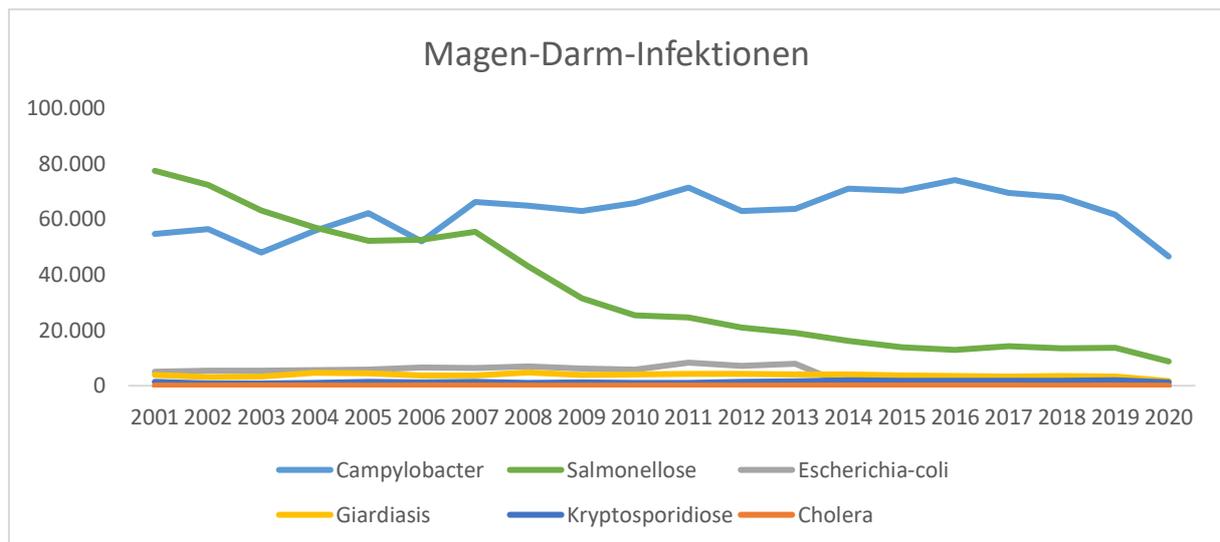
Im Folgenden soll eine Übersicht über die relevantesten Infektionskrankheiten gegeben, sowie deren Zusammenhänge mit dem Klimawandel aufgezeigt werden.

2.2.1. Durch Nahrungsmittel und Wasser übertragene Infektionskrankheiten

In Deutschland beobachtet man Magen-Darm-Erkrankungen ausgelöst durch z. B. Campylobacter oder Salmonellen in Lebensmitteln. Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung der Häufigkeiten der beiden Infektionskrankheiten in den letzten 20 Jahren. Bei warmen Temperaturen verstärkt sich das Auftreten dieser Bakterien. Bei Salmonellen, deren Häufigkeit in den letzten 20 Jahren stetig abgenommen

¹⁸ <https://climate-impact-explorer.climateanalytics.org/>

hat, erhöht sich die Anzahl der Krankheitsfälle linear um 5-10% pro 1°C Temperaturerhöhung (oberhalb des Schwellenwertes von 6°C)¹⁹.



Anmerkung: Statistik zu Escherichia-coli nur bis 2013 vorhanden

Wetterextreme können das Risiko von Erkrankungen, die durch verunreinigtes Wasser hervorgerufen werden, erhöhen. Bei Starkregen können Überflutungen von Kanalisationseinrichtungen zu Infektionskrankheiten führen (z. B. Flutereignis im Sommer 2021 an Ahr und Erft²⁰).

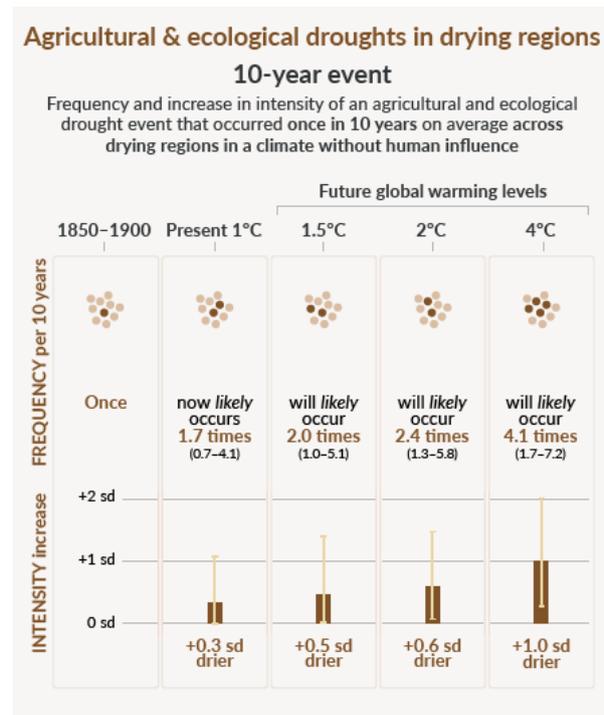
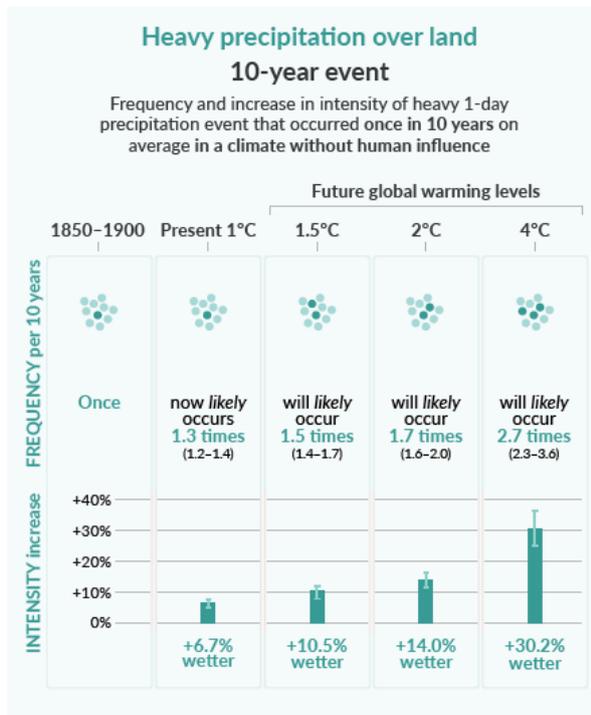
Bei Wassermangel infolge von extremer Trockenheit / Dürren können infektiöse Krankheiten wie Durchfall oder Cholera ausgelöst durch Hygienemangel oder verunreinigtes Wasser auftreten. Weltweit haben rd. 2,2 Mrd. Menschen keinen regelmäßigen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Der Mangel an sauberem Wasser und Hygiene gehört zu den häufigsten Todesursachen bei Kindern unter fünf Jahren²¹. Grundsätzlich stellt die Wasserqualität in Deutschland aktuell kein großes Problem dar. Allerdings zeigen Satellitendaten, dass Deutschland in 20 Jahren Wasser in einem Umfang des Bodensees verloren hat und jährlich rd. 2,5 km³ Süßwasser verliert.²² Der Klimawandel wird dieses Problem weiter verstärken. Die folgende Grafik aus dem IPCC AR6 zeigt die erwartete Veränderung von Niederschlägen und Dürren unter der Annahme unterschiedlicher Erwärmungsszenarien.

¹⁹ Kovats RS, Edwards SJ, Hajat S, Armstrong BG, Ebi KL, Menne B (2004) The effect of temperature on food poisoning: a time-series analysis of salmonellosis in ten European countries. *Epidemiol Infect* 132(3):443–453. doi:10.1017/s0950268804001992

²⁰ <https://www.zeit.de/news/2021-07/21/trinkwasser-nur-abgekocht-nutzen-krankheitserreger>

²¹ <https://www.oxfam.de/unsere-arbeit/themen/wasserknappheit>

²² <https://www.zdf.de/nachrichten/panorama/klima-wasser-knappheit-deutschland-100.html>



Die Auswirkungen von Intensität, Dauer und Verteilung der Niederschläge über die vier Jahreszeiten hinweg werden Einfluss auf die Menge und Qualität des Trinkwassers haben. Durch Wasserknappheit wird es zukünftig zu Migrationsbewegungen kommen. Die zunehmenden Wetterextremen werden zudem zu Beschädigungen von Wassersystemen und Infrastrukturen führen und somit das Trinkwasserproblem noch verstärken. Im Jahr 2008 waren nach einer Schätzung der WHO 2,4% der Durchfallerkrankungen auf Klimaänderungen zurückzuführen.

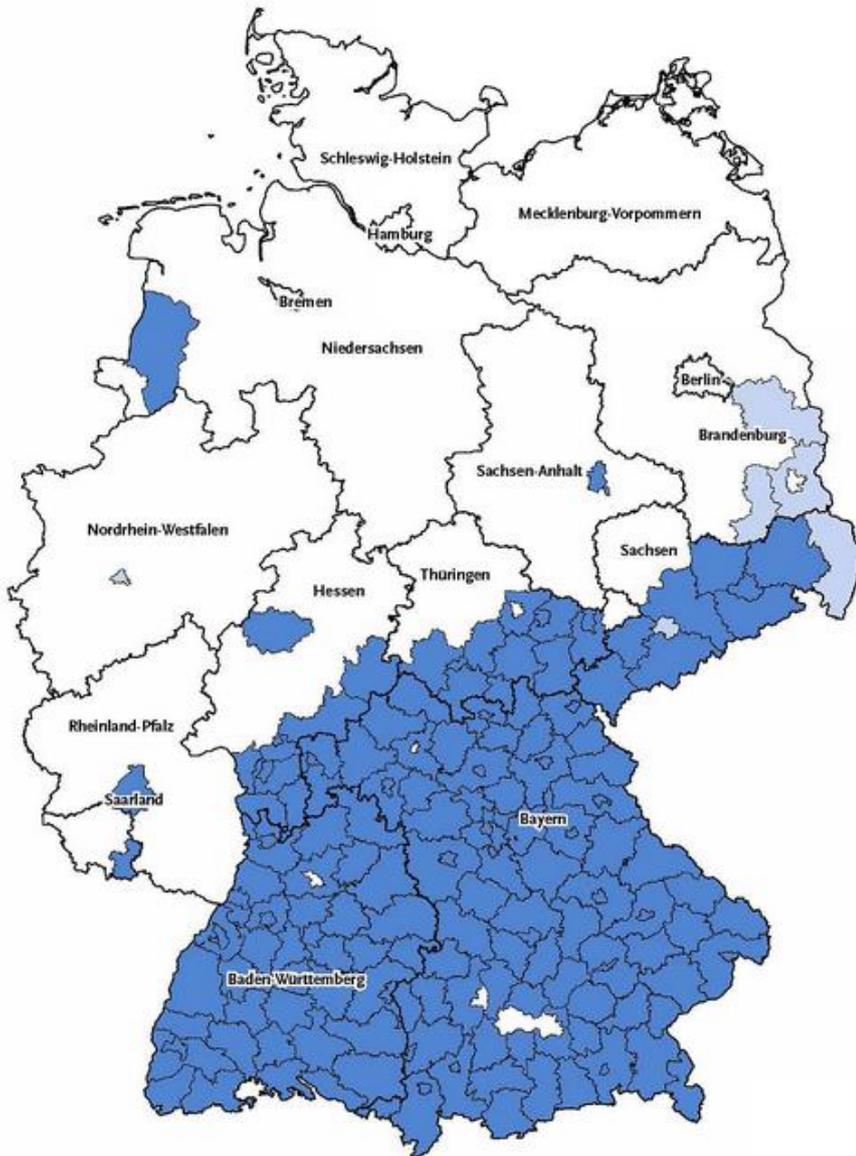
2.2.2. Durch Vektoren übertragene Infektionskrankheiten

Als Vektoren bezeichnet man die Überträger von Infektionskrankheiten (z. B. Insekten, Nagetiere). In Deutschland sind Zecken die häufigsten Überträger von Infektionskrankheiten. Dabei handelt es sich um die Lyme-Borreliose sowie die Frühsummer-Meningo-Enzephalitis (FSME), eine spezielle Form der Gehirnhautentzündung. Während die FSME vorwiegend in Süddeutschland auftritt, kommt die Borreliose deutschlandweit vor.

FSME-Risikogebiete in Deutschland

ROBERT KOCH INSTITUT

Basis: FSME-Erkrankungen in den Jahren 2002–2021, die dem RKI übermittelt wurden, n = 6.442; Stand: 21.01.2022



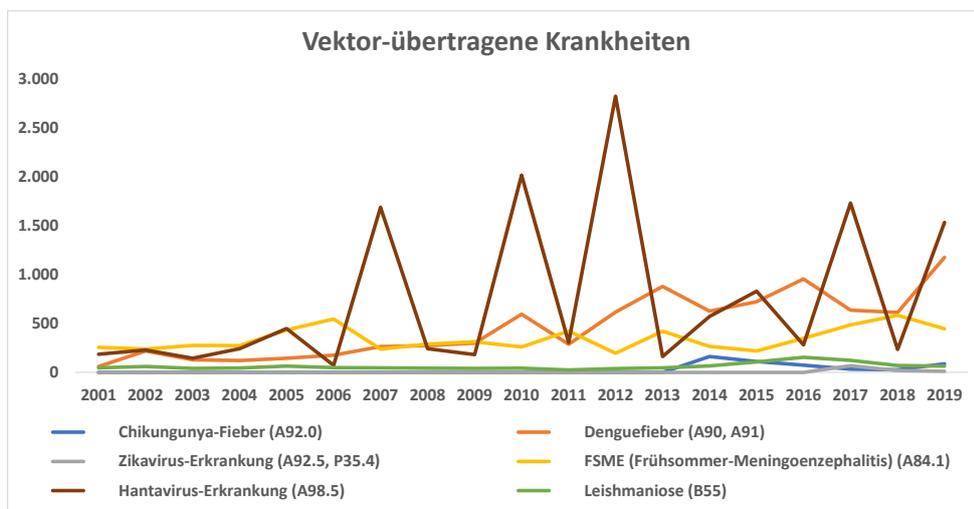
- Ein Kreis wird als FSME-Risikogebiet definiert, wenn die Anzahl der übermittelten FSME-Erkrankungen in mindestens einem der 16 Fünfjahreszeiträume im Zeitraum 2002–2021 im Kreis ODER in der Kreisregion (bestehend aus dem betreffenden Kreis plus allen angrenzenden Kreisen) signifikant ($p < 0,05$) höher liegt als die bei einer Inzidenz von 1 Erkrankung pro 100.000 Einwohner erwartete Fallzahl.
- Kreise, die im Jahr 2022 zum Risikogebiet ausgewiesen werden: SK Chemnitz, LK Görlitz, LK Oberspreewald-Lausitz, LK Oder-Spree, LK Spree-Neiße, SK Solingen
- Kein Risikogebiet
Kreise, die in Baden-Württemberg, Bayern und Sachsen keine Risikogebiete sind: Baden-Württemberg: SK Heilbronn; Bayern: SK Augsburg, LK Fürstentum, SK München, SK Schweinfurt; Sachsen: SK Leipzig, LK Leipzig, LK Nordsachsen

Wie die nachfolgende Grafik zeigt, hat die Anzahl der von Zecken übertragenen FSME in den letzten Jahren stetig zugenommen. Im Jahr 2020 hat sich die Zahl der FSME-Fälle nach RKI-Angaben sogar um fast 60% gegenüber 2019 auf 704 erhöht. Neben der Corona-Pandemie, die das Verhalten der Bevölkerung verändert hat und die Aktivitäten in der Natur verstärkt hat, ist aber auch ein Zusammenhang

mit dem Klimawandel zu erkennen. Die Aktivität der Zecken hängt von der Lufttemperatur ab (ab 8-10°C). Durch den stetigen Temperaturanstieg werden die Zecken bereits früher im Jahr aktiv und die Zeckensaison verlängert sich. Zudem begünstigen die höheren Temperaturen die Ausbreitung der Zecken auch nach Norddeutschland und in höhere Regionen. Neben dem Temperaturanstieg werden auch vermehrte Niederschläge die Lebensbedingungen der Zecken in Deutschland verändern (Verschlechterung durch geringere Niederschläge im Nordosten, Verbesserung durch mehr Niederschläge im Süden).

Die durch Zecken hervorgerufenen Erkrankungen können in den jeweiligen Fällen sehr hohe Kosten verursachen, da diese z. T. lange Krankheitsdauern bis hin zu irreversiblen Schäden hervorrufen können.

Allerdings stellen Impfungen ein sehr wirksames Instrument zur Vermeidung der FSME dar. Die Kosten für eine entsprechende Impfung belaufen sich auf rd. 50 € pro Dosis.



Grafik: Vektor-übertragene Krankheiten in Deutschland (Quelle)

Neben den beschriebenen Infektionskrankheiten, die ihren Ursprung in Deutschland haben, kommen auch tropische Infektionskrankheiten vor. Häufig werden diese Krankheiten durch die Einreise infizierter Personen nach Deutschland eingeschleppt. Eine direkte Ansteckung in Deutschland (*autochthone Ansteckung*) setzt voraus, dass sowohl der Krankheitserreger als auch ein geeigneter Wirt (Vektor) hierzulande vorkommen, was ausreichend warme Temperaturen voraussetzt. Durch den Anstieg der Durchschnittstemperaturen wird das Vorkommen solcher Vektoren jedoch auch in Deutschland begünstigt.

Übersicht Infektionskrankheiten:

Hantavirus:

Wie die obige Grafik verdeutlicht, weist das Hantavirus im Vergleich zu anderen Infektionskrankheiten durchaus relevante Fallzahlen in Deutschland auf. Es wird durch das Einatmen von Aerosolen aus erregerhaltigen Ausscheidungen von Röttermäusen übertragen. Damit ist die Häufigkeit der Erkrankungen offenbar von der

Anzahl der hierzulande vorkommenden Rötelmäuse abhängig. Diese wird begünstigt durch die geänderten klimatischen Bedingungen, da der Bestand der Nager in milderen Wintern nicht so stark dezimiert wird und außerdem gute Futterbedingungen bis in den Herbst gegeben sind. Aus denselben Gründen könnte auch die Ausbreitung weiterer von Nagetieren übertragener Erkrankungen wie die Hasenpest (Tularämie) oder das Feldfieber (Leptospirose) zukünftig bei uns begünstigt werden.

Leishmaniose:

Die Leishmaniose ist eine in den mediterranen Ländern auftretende Infektionskrankheit, die Geschwüre der Haut sowie Organschäden verursacht. In Deutschland spielt sie aktuell keine Rolle. Sie kann jedoch von Hunden auf den Menschen übertragen werden. Der eigentliche Vektor ist aber die Sandfliege, die sich aufgrund der zu geringen Temperaturen hierzulande (noch) nicht etabliert hat. Aufgrund des zu erwartenden Temperaturanstiegs infolge des Klimawandels wird die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung der Leishmaniose bis zum Ende des Jahrhunderts aber auch in Deutschland ansteigen.

Durch Moskitos übertragene Infektionskrankheiten:

Die am häufigsten auftretenden Infektionskrankheiten werden durch Mücken (Stechmücken, Mosquitos) übertragen. Wie die folgende Übersicht der WHO aus dem Jahr 2017 zeigt, sind Stechmücken für 212 Mio. Fälle von Malaria, für 96 Mio. Fälle von Dengue-Fieber, für 693 Tsd. Fälle von Chikungunya und 500 Tsd. Fälle

Annex 1. Global burden of major vector-borne diseases, as of March 2017

Some vector-borne diseases of specific local importance are included, as indicated by blue shading.

Vector	Disease	Estimated or reported annual number of cases	Estimated annual number of deaths	Estimated annual disability-adjusted life years
Mosquitoes	Malaria ¹	212 000 000 (148 000 000–304 000 000) ¹	429 000 (235 000–639 000) ¹	NA
	Dengue	96 000 000 (67 000 000–136 000 000) ²	9 110 (5630–10 842) ²	1 892 200 (1 266 700–2 925 500) ²
	Lymphatic filariasis	38 464 000 (31 328 000–46 783 000) ³	NA	2 075 000 (1 120 500–3 311 500) ³
	Chikungunya (Americas)	693 000 ⁷ suspected, 2015	NA	NA
	Zika virus disease (Americas)	500 000 ⁸ suspected, 2016	NA	NA
	Yellow fever (Africa)	130 000 (84 000–170 000) ⁹	500* (400–600) ³	31 000* (25 000–37 000) ³
	Japanese encephalitis	42 500* (35 000–50 000) ¹⁰	9 250* (3500–15 000) ¹⁰	431 552* (107 435–755 670) ¹⁰
	West Nile fever	2 588 ¹¹	111 ¹¹	NA
Blackflies	Onchocerciasis	15 531 500 (11 963 500 – 19 993 800) ⁶	NA	1 135 700 (545 800–2 005 700) ⁵
Sandflies	Muco/cutaneous leishmaniasis	3 895 000 (3 324 000–4 767 000) ⁶	NA	41 500 (19 000–80 000) ⁵
	Visceral leishmaniasis	60 800 (57 500–64 700) ⁶	62 500 (52 300–73 300) ³	1 377 400 (3 488 000–5 045 000) ⁵
Triatomine bugs	Chagas disease	6 653 000 (5 750 000–7 575 000) ⁶	10 600 (4200–33 000) ³	236 100 (211 800–265 300) ⁵
Ticks	Borreliosis (Lyme disease)	532 125 ^{12,13}	NA	10.5 (7.6 – 16.9) per 100 000 population in the Netherlands ¹⁴
	Tick-borne encephalitis (North Eurasia)	10 000 – 12 000 ¹⁵	NA	167.8 per 100 000 population in Slovenia ¹⁶
Tsetse flies	Human African trypanosomiasis (Africa)	10 700 (6 000–17 000) ⁶	6 900 (3700–10 900) ³	202 400 (104 600–322 300) ⁵
Snails	Schistosomiasis	207 000 000 ¹⁷	200 000 ⁵	2 613 300 ⁵
Varicous	Other: ^{**} Rift Valley fever, O'nyong nyong virus, Mayaro virus, Crimean-Congo haemorrhagic fever, rickettsial diseases, plague	NA	NA	NA

NA, not available

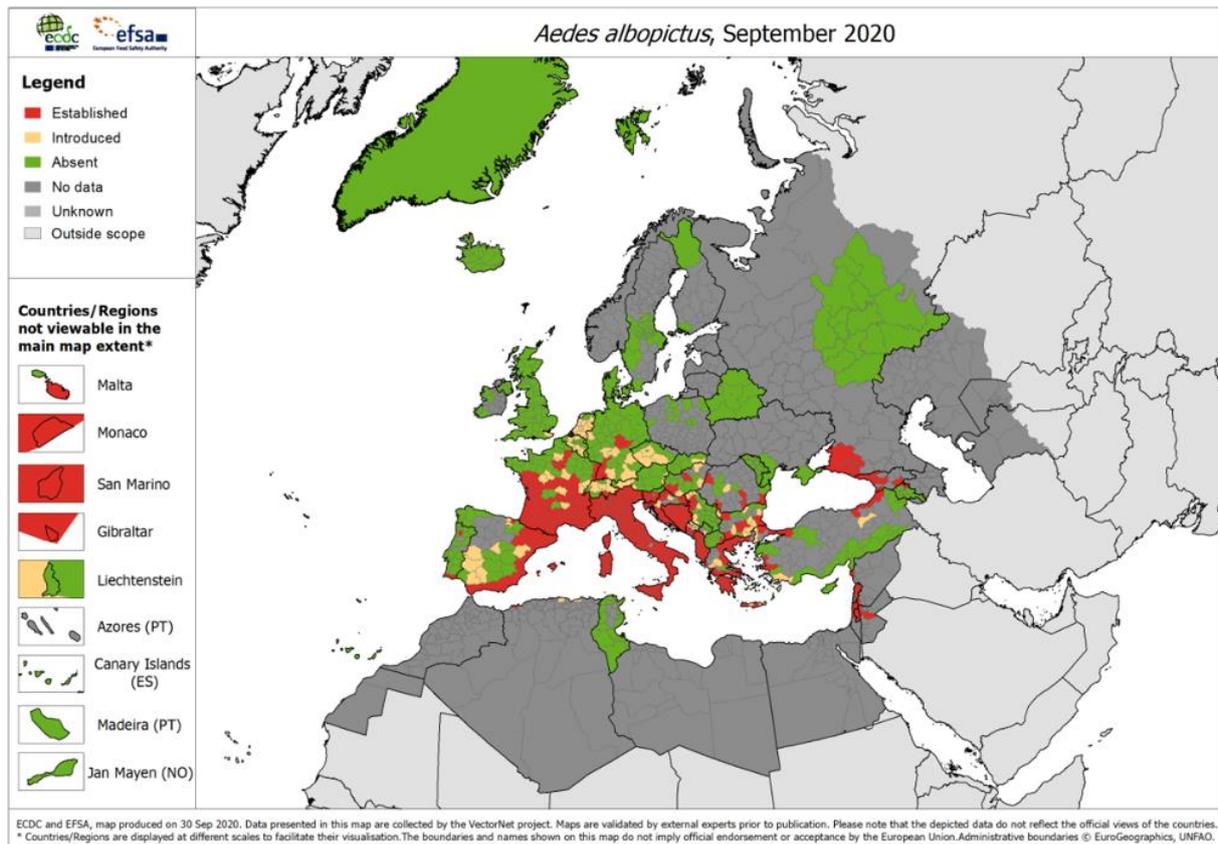
* Best estimate based on average of range.

** Potential emerging vector-borne diseases causing outbreaks, for which global data are currently limited.

Grundsätzlich hängen das Aufkommen und die Verbreitung von Stechmücken stark von den klimatischen Bedingungen ab. Die Malaria wird beispielsweise von den Anopheles Mücken übertragen, die zum Überleben eine Minimaltemperatur von 8-10°C benötigen. Die krankheitsauslösenden Parasiten (*Plasmodium falciparum*) brauchen mindestens 16-19°C. D. h. die Temperatur spielt eine entscheidende Rolle für die Übertragung von tropischen Infektionskrankheiten. Hinzu kommt, dass hohe Temperaturen die Entwicklungszeit von Krankheitserregern in der Mücke (Inkubationszeit) verkürzen, so dass sich der Zeitraum, in dem die Krankheit übertragen werden kann, verlängert. Zudem werden bei höheren Temperaturen die Brutzyklen beschleunigt, d. h. die Zahl der Mücken und somit die Wahrscheinlichkeit der Übertragung von Infektionskrankheiten steigt. Wie bereits bei der Population der Nagetiere erwähnt, führen auch bei den Stechmücken die Veränderungen in der Saisonalität (mildere, wärmere Winter) zum Überleben der Vektoren,

so dass sich der Übertragungszeitraum verlängern wird. Hierzu passt die aktuelle Meldung²³ von Juli 2022, dass die asiatische Tigermücke erstmalig in Berlin überwintern konnte.

Das Dengue-Fieber, dessen Vektor (Tigermücke, *Aedes albopictus*) bereits in vielen Regionen in Südeuropa etabliert ist, ist vereinzelt bereits in südeuropäischen Regionen ausgebrochen (Erreger wurde durch Touristen eingeschleppt und von der Tigermücke weitergetragen). Auch in Deutschland wurde diese Mückenart bereits 2007 entlang der großen Verkehrsrouten aus Südeuropa nachgewiesen (s. Grafik). Aufgrund des durch den Klimawandel zu erwartenden Temperaturanstiegs werden auch in Deutschland vereinzelt autochthone Ausbrüche des Dengue-Fiebers erwartet.



In der folgenden Tabelle wird eine Übersicht über die relevantesten Infektionskrankheiten sowie eine Einschätzung des Ausbreitungsrisikos in Deutschland aufgrund klimatischer Veränderungen gegeben.

²³ <https://www.bz-berlin.de/berlin/treptow-koepenick/asiatische-tigermuecke-erneut-in-berliner-kleingaerten-nachgewiesen>

■ Tab. 14.1 Übersicht über die wesentlichen klimasensiblen Infektionskrankheiten, ihre Erreger, den Übertragungsweg (ggf. Vektor) und eine Einschätzung der Zunahme des Risikos je nach Zeiträumen und Ausmaß der globalen Erwärmung (+2°C bis +4°C). Die qualitative Einschätzung orientiert sich an der im Text zitierten Literatur

Krankheit	Erreger	Übertragung (ggf. Vektor)	Derzeitige Gefährdung	Bis 2050	Bis 2100 +2°C-Welt	Bis 2100 +4°C-Welt
Magen-Darm-Erkrankungen (ggf. Wundinfektionen und Blutvergiftung bei Vibrionen)	Salmonellen, <i>Campylobacter</i> und andere	Nahrung	++	++	++	++
	<i>Giardia lamblia</i>	Süßwasser	+	+	+	++
	<i>Cryptosporidium</i>		+	+	+	++
	<i>E. coli</i> , <i>Campylobacter</i>		+	++	++	+++
	Vibrionen (z. B. <i>V. cholerae</i>)	Süß- und Meerwasser	+	+	+	++
Hautreizungen, Magen-Darm-Beschwerden, Leberschäden, neuronale Schäden	Toxin produzierende Cyanobakterien („Blaualgen“), Toxin-Beispiele: Microcystine, Anatoxin	Meerwasser, Verzehr von Meeresfrüchten, selten Trinkwasser	0	+	+	++
Lyme-Borreliose	<i>Borrelia burgdorferi</i>	Zecken (<i>Ixodes ricinus</i>)	+	++	++	+++
FSME*	FSME-Virus	Nager (ggf. im Zuge von Überschwemmung**)	+	+	++	+++
Leptospirose (Feldfieber)	Spirochäten		+	+	+	++
HFRS***	Hantavirus (Art: Puumalavirus)	Nager	+	+	++	++
Tularämie (Hasenpest)	<i>Francisella tularensis</i>	Nager, Zecken, Mücken	+	+	+	++
Malaria tropica	<i>Plasmodium falciparum</i>	<i>Anopheles</i> -Mücken	0	0	+	++
Malaria tertiana	<i>Plasmodium vivax</i> , <i>Plasmodium ovale</i>	<i>Anopheles</i> -Mücken	0	0	+	++
Leishmaniose der Haut	<i>Leishmania infantum</i>	Sandmücken	0	+	+	+++
Denguefieber	Denguevirus	<i>Aedes</i> -Mücken	0	+	+	+++
Gelbfieber	Gelbfiebervirus	<i>Aedes</i> -Mücken	0	+	+	++
Chikungunyafieber	Chikungunyavirus	<i>Aedes</i> -Mücken	0	+	+	++
West-Nil-Fieber (WNF)	WNF-Virus	<i>Culex</i> -Mücken	0	+	+	++

*FSME = Frühsommer-Meningoenzephalitis, **Süßwasserüberschwemmungen, ***HFRS: hämorrhagisches Fieber mit renalem Syndrom
0 = praktisch keine Gefährdung, + = Krankheit kommt vereinzelt vor, ++ = Krankheit häufiger, gut beherrschbar, +++ = Krankheit häufiger, Herausforderung für Anpassung

Quelle: Klimawandel in Deutschland (2017)

Hinzuweisen sei auf die bereits bestehenden sowie möglichen zukünftigen Anpassungs- und Risikominderungsmaßnahmen für die Ausbreitung von Infektionskrankheiten. Neben den bereits angesprochenen Impfungen gegen die von Zecken verbreitete FSME, wurde auch die Malaria durch Trockenlegung von Brutgebieten, gezielte Mückenbekämpfung sowie verbesserte Gesundheitsversorgung in Deutschland ausgerottet. Eine Rückkehr erscheint daher eher unwahrscheinlich. Auch für die Vermeidung der anderen erwähnten Infektionskrankheiten ist neben einem verbesserten und integrierten Melde- und Warnsystem eine bessere Aufklärung der Bevölkerung (z. B. größeres Bewusstsein für die Infektionskrankheiten, besserer Schutz gegen Zecken und Mücken sowie Präventionsmaßnahmen und rasche Diagnosen und Behandlung) erforderlich. Durch die Corona-Pandemie könnte die Schaffung von Aufmerksamkeit auf diese Krankheiten in der Bevölkerung gewachsen sein. Des Weiteren wird natürlich eine gezielte Forschung sowie die (Weiter-)Entwicklung von Medikamenten und Impfstoffen gegen diese Krankheiten benötigt.

Die Bedeutung der Zunahme von Infektionskrankheiten wird auch in der Aufsichtsstudie zu den Auswirkungen des Klimawandels der französischen Banken- und Versicherungsaufsicht (ACPR, Autorité de contrôle prudentiel et de résolution) aus dem Jahr 2020/2021 deutlich. Dort wird ein explizites Stress-Szenario für Krankenversicherer definiert, in dem die Zunahme von Infektionskrankheiten durch die stärkere landesweite Ausbreitung der Tigermücke bis zum Jahr 2050 angenommen wurde (s. Grafik: Entwicklung des Vorkommens der Tigermücke in Frankreich von 2020 bis 2050; je dunkler, desto größer ist die Anzahl der Tigermücke).



Auf Basis dieser Annahme wurden Sterbewahrscheinlichkeiten (und daraus abgeleitete Todesfalleistungen), Gesundheitskosten sowie Arbeitsunfähigkeiten abgeleitet. Die Ergebnisse der Auswirkungen wiesen starke regionale Unterschiede auf.

2.2.3. Klimawandel und Corona²⁴

Zoonosen sind Infektionskrankheiten, die von Bakterien, Parasiten, Pilzen, Prionen oder Viren verursacht und wechselseitig zwischen Tieren und Menschen übertragen werden können. 60% der weltweit auftretenden Infektionskrankheiten sind auf Zoonosen zurückzuführen, die ihren Ursprung zumeist in Wildtieren haben. Die Fledermäuse haben dabei den größten Anteil. Schätzungsweise werden 3.000 verschiedene Coronaviren (Cov) von Fledermäusen übertragen, darunter insb. auch drei Typen, die bereits zu Todesfällen bei Menschen geführt haben, nämlich MERS, SARS-Cov-1 und SARS-Cov-2.

Offenbar ist die Anzahl der in einer Region auftretenden Coronaviren stark positiv korreliert mit der Anzahl der Fledermausarten. Dies legt die Annahme nahe, dass eine Zunahme von Fledermäusen / Fledermausarten innerhalb einer Region die Wahrscheinlichkeit für neuartige und den Menschen schädliche Cov-Varianten erhöht.

Der Klimawandel hat direkten Einfluss auf den Artenreichtum und die geografische Verteilung der Arten. Dies wirkt sich zum einen auf die räumliche Verteilung der Zoonosen als auch auf eventuell neue Wirt-Pathogen-Interaktionen aus, wodurch neue Übertragungswege und / oder neue Krankheitsvarianten entstehen können.

²⁴ Robert M. Beyer, Andrea Manica, Camilo Mora, Shifts in global bat diversity suggest a possible role of climate change in the emergence of SARS-CoV-1 and SARS-CoV-2 (2021)

In der angegebenen Untersuchung wird dargestellt, wie sich die globale Verteilung der Fledermausarten seit Anfang des 20. Jahrhunderts verschoben hat, um daraus Rückschlüsse für die Ausbreitung von Coronaviren zu ziehen.

R.M. Beyer, A. Manica and C. Mora

Science of the Total Environment 767 (2021) 145413

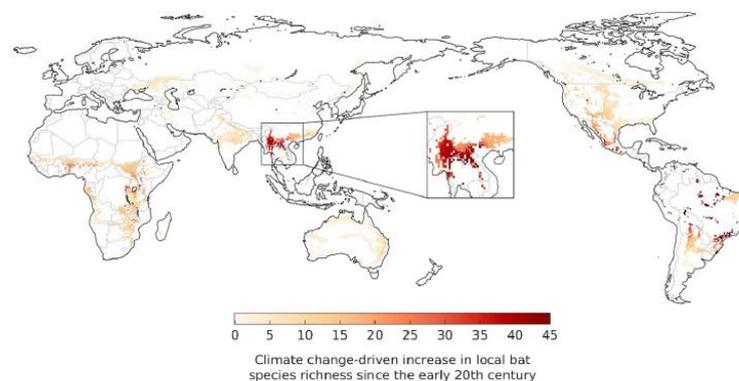


Fig. 1. Estimated increase in the local number of bat species due to shifts in their geographical ranges driven by climate change between the 1901-1930 and 1990-2019 period. The zoomed-in area represents the likely spatial origin of the bat-borne ancestors of SARS-CoV-1 and 2.

Wie man sieht, gibt es eine signifikante Zunahme der Fledermausarten aufgrund des Klimawandels in Regionen Zentralafrikas, in einzelnen Gebieten in Mittel- und Südamerika und v. a. einen großen Bereich in der südchinesischen Provinz Yunnan sowie die angrenzenden Regionen in Myanmar und Laos. Diese Regionen gelten als wahrscheinlicher Ursprung der von Fledermäusen übertragenen Vorgänger von SARS-Cov-1 und 2. Die durch den Klimawandel bedingte Zunahme von 40 Fledermausarten in dieser Region entspricht einem Anstieg von Cov-Varianten in der Größenordnung von 100 (+/- 50), da jeder Fledermausart durchschnittlich 2,67 (+/- 1,38) Cov's in sich trägt.

Hintergrund für die Klimawandel-bedingte Zunahme der Fledermausarten in der Region Yunnan ist die Verschiebung von tropischen Buschlandschaften zu tropischen Savannen und Laubwäldern im letzten Jahrhundert ausgelöst durch klimatische Veränderungen durch Anstieg der CO₂-Werte in der Atmosphäre, höhere Temperaturen, veränderte Niederschlagsmengen und geringere Wolkenbedeckung. Dies hat zu einer deutlichen Verbesserung der Lebensbedingungen für Fledermausarten geführt, die waldähnliche Lebensräume benötigen.

Die Analyse legt einen klaren Zusammenhang zwischen dem Klimawandel und der Ausbreitung von Fledermaus-übertragenden Cov's in der Region Yunnan nahe. Hinweise auf einen ähnlichen Beitrag des Klimawandels auf die Ausweitung anderer Coronavarianten sind weniger ausgeprägt. Z. B. wird der Ursprung des Fledermaus-übertragenden Vorgängers von MERS-Cov in Ostafrika vermutet. In dieser Region gibt es jedoch nur eine geringe Zunahme an Fledermausarten aufgrund des Klimawandels.

Die Auswirkungen auf das deutsche Gesundheitssystem durch eine potentielle Zunahme von Infektionskrankheiten bzw. globalen Pandemien kann mit Hilfe von Pandemie- / Epidemiemodellen aufgezeigt werden.

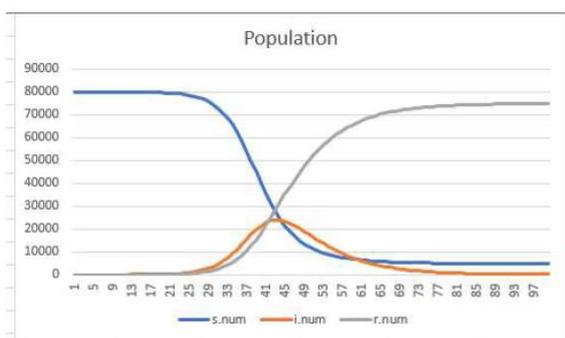
2.2.4. Mathematisches Modell zur Modellierung von Epidemien

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, die Dynamik einer Epidemie mathematisch zu beschreiben. Eine Klasse von mathematischen Modellen stellen die sogenannten SIR-Modelle dar. Hierbei handelt es sich um ein Modell, mit dem die Ausbreitung von Epidemien innerhalb einzelner Bevölkerungsgruppen simuliert werden kann. Ausgangspunkt sind dabei die Gruppe der gefährdeten Personen (**S**=susceptibles), die von einzelnen infizierten Personen (**I**=infectious) mit der Krankheit angesteckt werden und nach einer Inkubationszeit erkranken können. Nach dem Stadium der Erkrankung werden viele der infizierten Personen genesen (**R**=recovered), ein Teil jedoch auch versterben. Die Dynamik innerhalb des SIR-Modells wird über ein System von Differentialgleichungen beschrieben. Da die epidemischen Prozesse i. d. R. zeitdiskret verlaufen (z. B. Neuerkrankungen pro Tag), kann anstelle der Differentialgleichungen auch ein System von Differenzgleichungen treten. Diese lassen sich dann auch problemlos in Excel implementieren. Ansonsten stehen z. B. entsprechende R-Pakete für die SIR-Modellierung zur Verfügung.

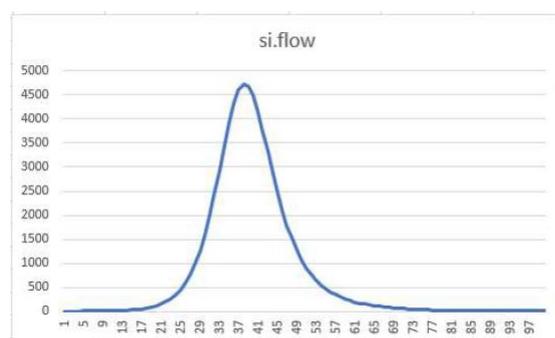
Das System der Differenzgleichungen sieht dabei wie folgt aus:

Gesamt-Population:	$\#G(t) = \#S(t) + \#I(t) + \#R(t)$	
Entwicklung Anzahl Gefährdete:	$\#S(t + 1) - \#S(t) = -\#I^{neu}(t) - \#DS(t)$	} #DS = Anzahl Tote aus S(t) #DI = Anzahl Tote aus I(t) #DR = Anzahl Tote aus R(t)
Entwicklung Anzahl aktuell Gesamt-Infizierte:	$\#I(t + 1) - \#I(t) = \#I^{neu}(t) - \#R^{neu}(t) - \#DI(t)$	
Entwicklung Anzahl Genesene:	$\#R(t + 1) - \#R(t) = \#R^{neu}(t) - \#DR(t)$	
Anzahl Neu-Infizierte:	$\#I^{neu}(t) = \beta(t) \cdot \#I(t)$	
Anzahl neue Genesene:	$\#R^{neu}(t) = \gamma(t) \cdot \#I(t)$	
Neu-Infektionsrate:	$\beta(t) = inf.rate \cdot act.rate \cdot \frac{\#S(t)}{\#G(t)}$	} inf.rate = Wahrscheinlichkeit einer Übertragung von Person(I) auf Person(S) act.rate = durchschnittliche Anzahl Kontakte innerhalb einer Zeiteinheit
Genesungsrate:	$\gamma(t)$	

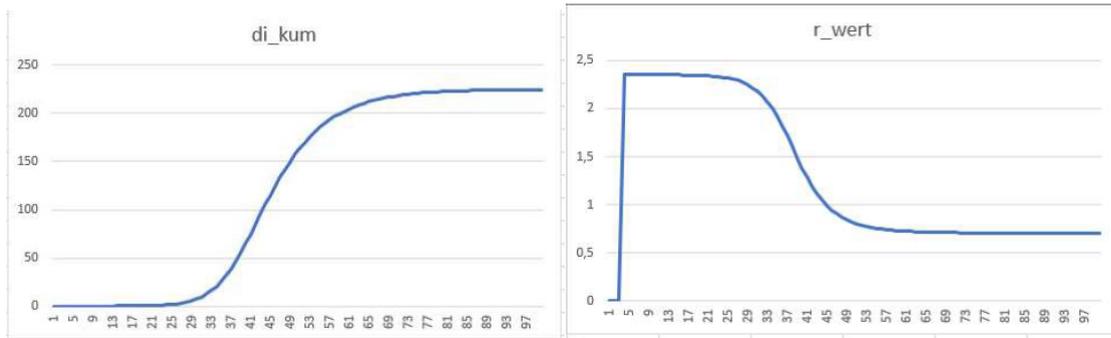
In der Grundvariante des SIR-Modells werden alle gefährdeten Personen innerhalb eines gewissen Zeitraums erkranken und danach genesen oder versterben. Damit ergibt sich folgendes Bild:



Entwicklung der Gefährdeten, Infizierten, Genesenen



Anzahl der Neuinfektionen pro Tag



Anzahl der gestorbenen Infizierten

R-Wert im Zeitablauf

Eine wichtige Kennzahl für die Beschreibung der Ausbreitung eines Krankheitserregers in einer Population ist die **Basisreproduktionszahl (R-Wert)**. Der R-Wert gibt den Erwartungswert für die Anzahl neuer Infektionsfälle an, die auf eine einzelne infizierte Person während deren gesamten Infektionszeitraums zurückzuführen sind. Mathematisch kann man den R-Wert wie folgt formulieren:

Zu Beginn einer Epidemie ist $S \approx G$. D sei der Zeitraum, in dem eine Person infektiös ist. Mit $D = 1/\gamma$ man kann die Veränderung der Anzahl der infizierten Personen innerhalb des Zeitraums D näherungsweise wie folgt berechnen:

$$I(t) - I(t - D) \approx \left(\beta \cdot \frac{S(t - D)}{G} - \gamma \right) \cdot D \cdot I(t - D)$$

Mit

$$I(t) - I(t - D) = (R - 1) \cdot D \cdot I(t - D)$$

ergibt sich dann:

$$R \approx \frac{\beta}{\gamma}$$

Dieser Zusammenhang gilt am Anfang einer Epidemie. Im weiteren Verlauf bietet es sich an, den R-Wert empirisch zu ermitteln. Das RKI benutzt dazu folgende Formel:

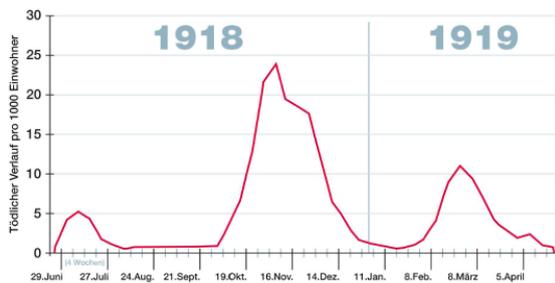
$$R = \frac{\sum_{t=-7}^0 I^{neu}(t)}{\sum_{t=-11}^{-4} I^{neu}(t)}$$

Interessant ist, dass der R-Wert bei einem einfachen „Laufenlassen“ der Erkrankungen im Laufe der Zeit unter 1 fällt und somit ein Ausklingen der Epidemie anzeigt. Dies liegt daran, dass der Anteil der Genesenen (und in diesem Grundmodell nicht wieder infizierbaren Personen) immer weiter zunimmt und gleichzeitig die Anzahl der Gefährdeten immer weiter abnimmt.

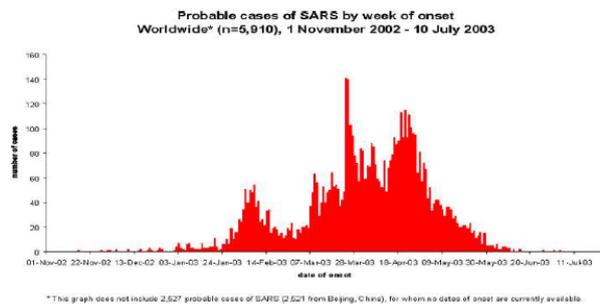
Wie die Corona-Pandemie (und auch andere Pandemien in der Vergangenheit) gezeigt hat, beschreibt dieser Verlauf jedoch nicht den tatsächlichen Verlauf einer Epidemie. Vielmehr ist es so, dass Epidemien mehr als eine „Welle“ besitzen und

erst danach abklingen. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. Zum einen ist es möglich, dass sich auch Genesene nach einer Zeit wieder infizieren können.

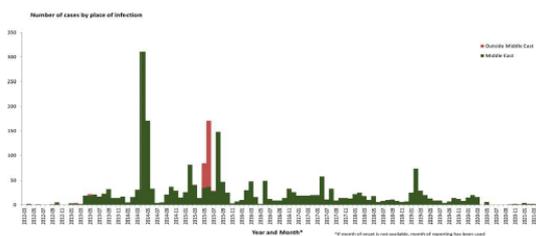
Spanische Grippe 1918/1919



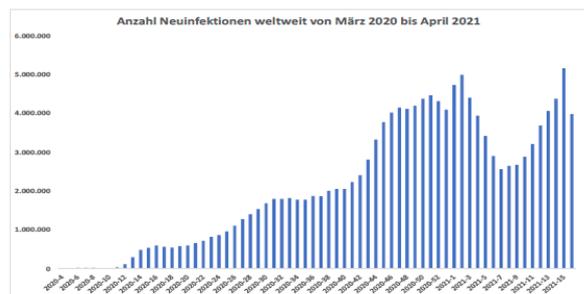
Sars Epidemie 2002/2003



MERS 2012-2021



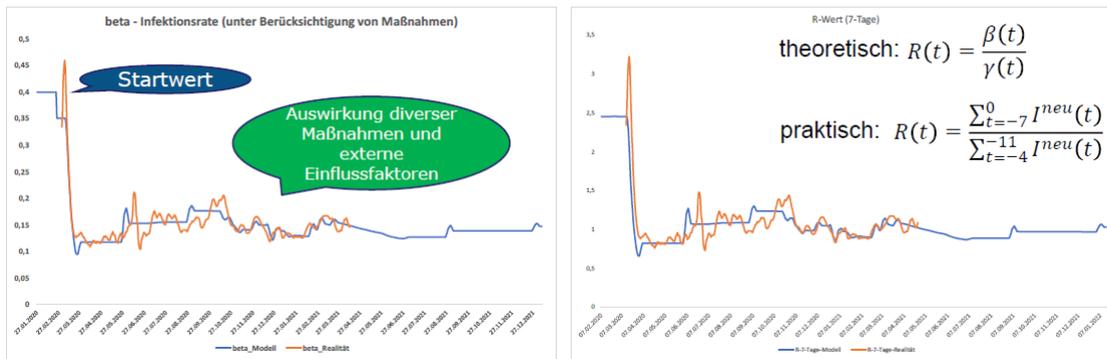
Covid-19 2020-?



Zudem führen in der Realität (gesundheits-)politische Maßnahmen dazu, dass sich die Anzahl der Neuinfektionen reduzieren, um somit eine Überlastung des Gesundheitssystems (insb. der Krankenhäuser) zu vermeiden. Daher ist eine Erweiterung des Grundmodells erforderlich. Dabei kommen insb. folgende Punkte in Betracht:

- Erweitertes Grundmodell: SIRS-Modell, d. h. eine wiederholte Ansteckung ist möglich und sollte modelliert werden
- Berücksichtigung von Maßnahmen zur Reduktion der Neuinfektionen (Kontaktbeschränkungen, Impfungen, Ausweitung Tests) und deren Wirksamkeit (z. B. zeitlich verzögerte Wirkung)
- Berücksichtigung von saisonalen Effekten (falls vorhanden)
- Berücksichtigung von Infektionen von außerhalb der eigenen Bevölkerung (z. B. Flug-/Reiseverkehr)
- zeitliche Veränderung der Parameter (z. B. ausgelöst durch Mutationen)
- Übergang vom Eingruppen- zu Mehrgruppenmodell
- Definition verschiedener Bevölkerungsgruppen (z. B. unterschiedliche Altersgruppen) und Modellierung des Epidemie-Verlaufs auf den unterschiedlichen Gruppen
- Festlegung gruppenspezifischer Parameter (z. B. unterschiedliche Impfquote)
- Festlegung von Interaktionen zwischen den Gruppen (z. B. Kontaktraten)

Durch die recht einfache Beschreibung des Modells mittels Differenzgleichungen lassen sich die Formeln zur Beschreibung des Epidemie-Verlaufs gut um die beschriebenen Effekte erweitern.



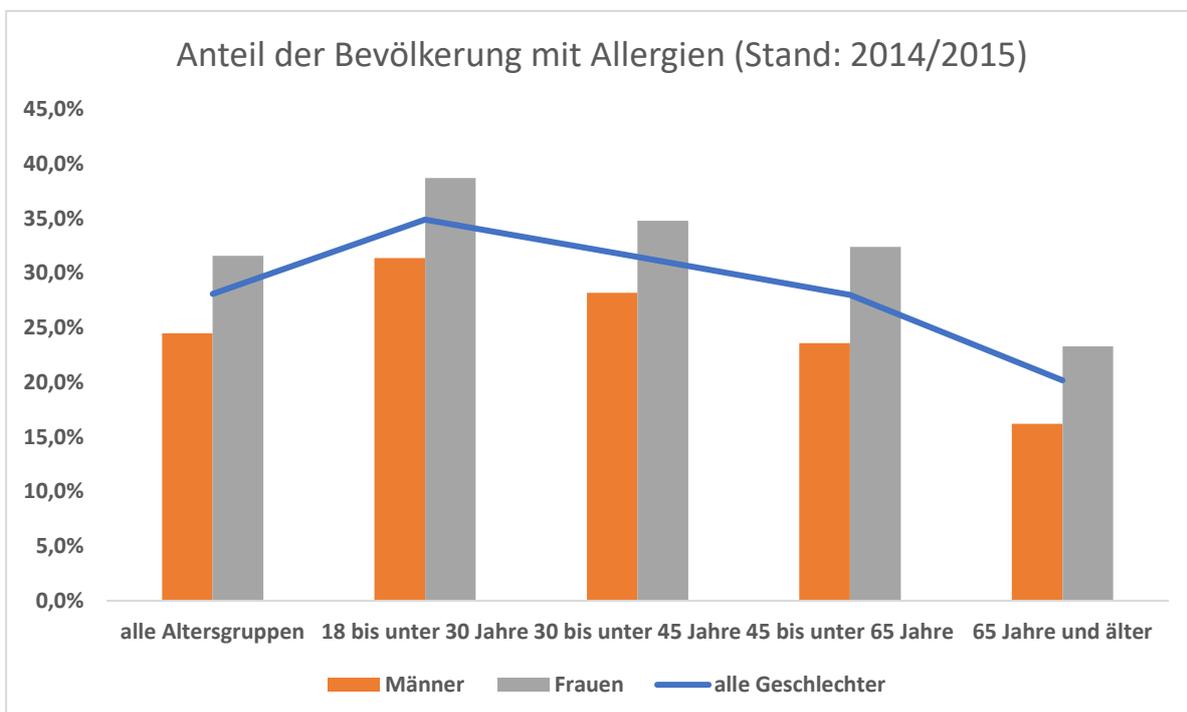
Durch Anpassung des SIR-Modells und eine geeignete Parametrisierung der Parameter, insb. der Infektionsrate beta (z. B. durch den Einfluss von Kontaktbeschränkungen, Masken, Lockdown u. ä., aber vermutlich auch durch äußere Einflüsse (z. B. geringere Infektionen im Sommer, erhöhte Infektionen durch Reiserückkehrer)), ergibt sich der typische Verlauf mit mehreren Wellen. Der R-Wert ergibt sich dann als Ergebnis der Modellierung.

Eine detaillierte Darstellung der Epidemie-Modellierung findet man z. B. in „An Introduction to Mathematical Modeling of Infectious Diseases“ von M. Li.

2.3. Pollen, Allergien und Luftverschmutzung

2.3.1. Pollen und Allergien

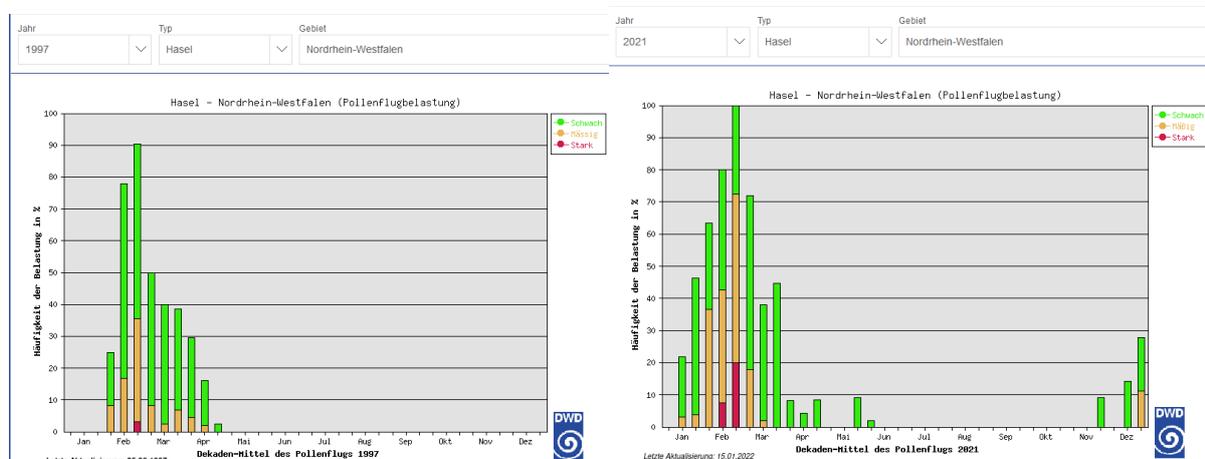
Nach Angaben der WHO leiden weltweit 30-40% der Menschen unter Allergien. Das RKI gibt an, dass etwa 30% der Bevölkerung in Deutschland an Allergien leiden (s. Grafik aus dem Jahr 2014/2015), 14,8% leiden unter Heuschnupfen.



Der Klimawandel hat einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung von Allergien, da er Auswirkungen auf allergene Pflanzen hat und z. B. die Pollenflugsaison verändert mit Folgen für die Pollenmenge und die Pollenintensität. Zudem führt z. B. die Erhöhung der Durchschnittstemperaturen dazu, dass sich neue Pflanzenarten in Deutschland ansiedeln können (invasive Arten) und dadurch ebenfalls die Pollenflugsaison verlängern.

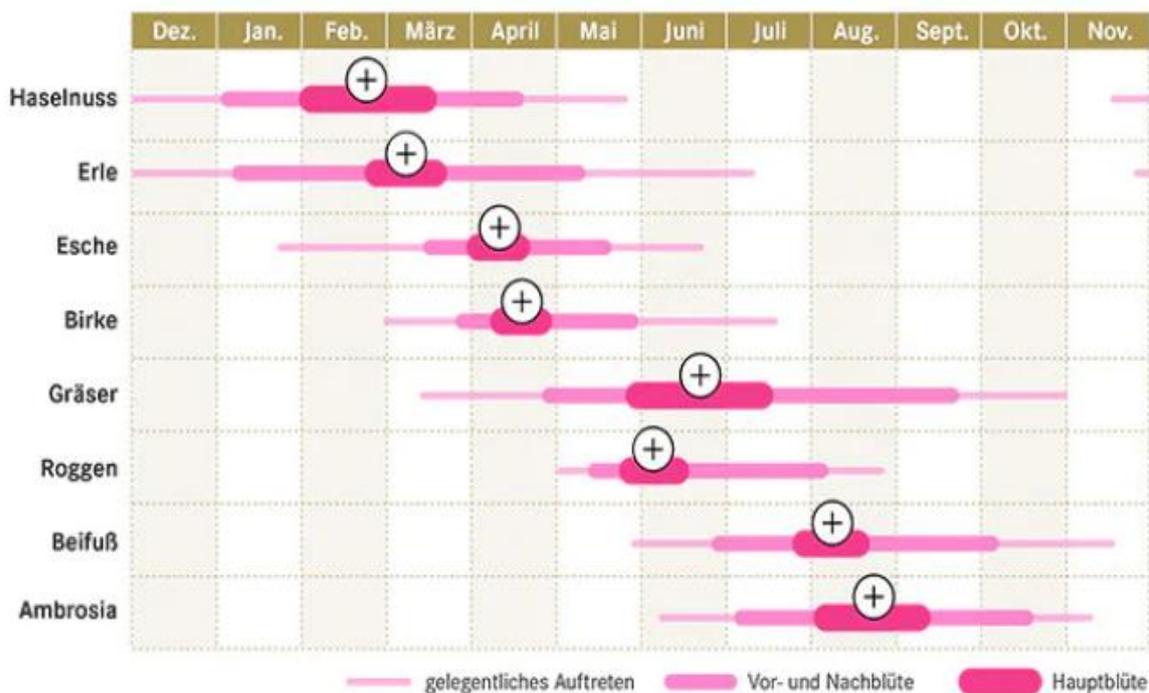
Die Pollensaison wird von der *Pflanzenphänologie* bestimmt. Hierunter versteht man die jahreszeitlich wiederkehrenden Erscheinungen in der Pflanzenwelt (d. h. der Kreislauf von Blütezeiten im Frühjahr bis zum Blattabwurf im Herbst). Gerade die Blütezeiten im Frühjahr ist temperaturgetrieben. Durch die milderen Witterungen im Frühjahr hat sich haben sich die Blütezeiten in den letzten 30 Jahren um rund zwei Wochen verfrüht, wodurch die Pollensaison deutlich früher startet und sich – insb. für Gräser – auch verlängert. Dadurch werden Allergiker über einen längeren Zeitraum den Pollen ausgesetzt.

Die folgenden beiden Grafiken zeigen exemplarisch die Pollenflugveränderung für Haselnuss in NRW von 1997 (linke Grafik) bis 2021 (rechte Grafik) (Quelle: Pollenflugstatistik des DWD).



Offensichtlich hat sowohl der Zeitraum, in dem die Pollen des Haselnussstrauches beobachtet werden können, als auch deren Intensität deutlich zugenommen.

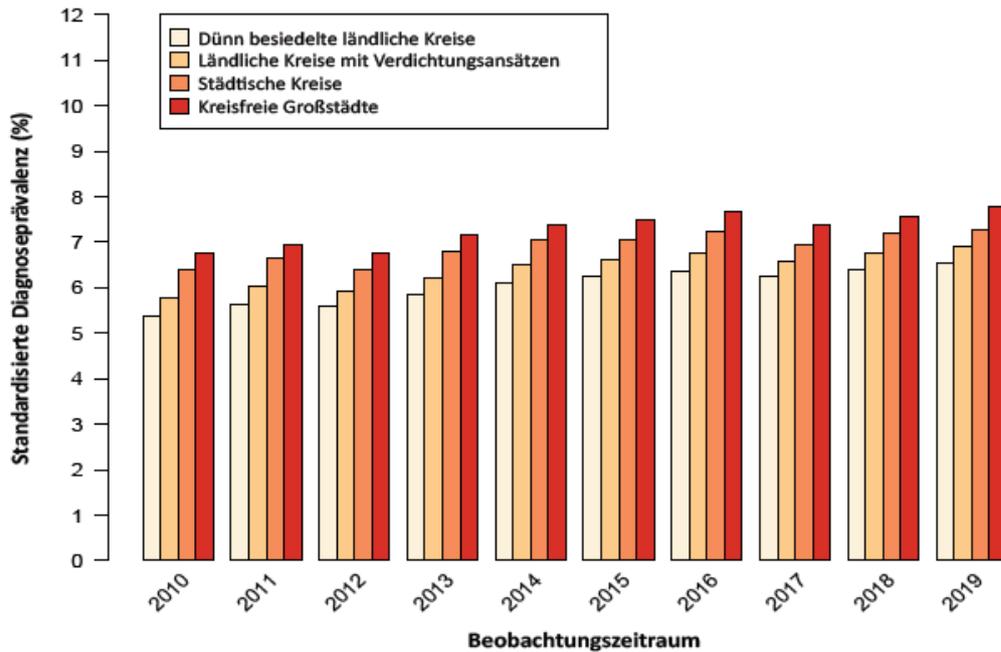
Neben der Verlängerung der Blütezeiten heimischer Pflanzen hat der Anstieg der Temperatur in Deutschland in den letzten Jahrzehnten auch dazu geführt, dass sich neue Pflanzenarten hierzulande ansiedeln. Das bekannteste Beispiel hierfür ist der Ambrosia. Ursprünglich kommt der Ambrosia aus Nordamerika, ist aber seit den 1980er-Jahren auch in Südeuropa beheimatet. In Deutschland kommt diese Pflanze in wärmeren Regionen (Rheintal, Südhessen, Ostbayern sowie Berlin und Brandenburg) vor. Durch den zu erwartenden zukünftigen Temperaturanstieg wird sie sich in weiteren Gebieten ausbreiten. Der Ambrosia ist sowohl durch seine hochallergenen Pollen (etwa viermal so allergen wie Birkenpollen) als auch durch seine Blütezeit im Spätsommer und Herbst ein Problem für Pollenallergiker. Wie der aktuelle Pollenflugkalender zeigt, verlängert der Ambrosia die Pollenflugsaison (insb. die Hauptblütezeit) um fast vier Wochen, so dass sich der Zeitraum ohne nennenswerten Pollenflug im Jahr deutlich verkürzt.



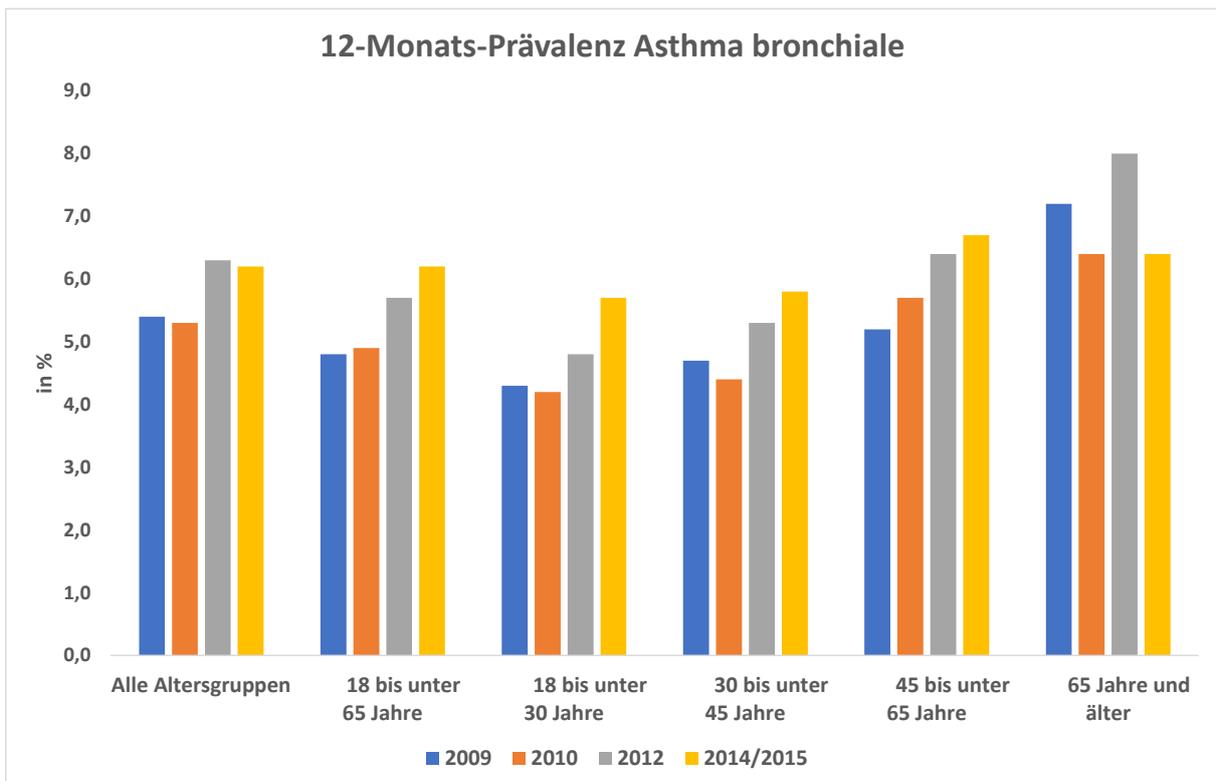
Studien (auch für Deutschland) zeigen, dass zu der Verlängerung der Pollenflug-saison auch eine gestiegene Pollenmenge hinzukommt (s. auch Grafik oben), wodurch häufigere und schwerere Erkrankungen begünstigt werden. Ursache für den Anstieg der Pollenmenge ist neben dem Temperaturanstieg auch die gestiegene CO₂-Konzentration. Bei Pollenallergenen handelt es sich um allergene Eiweiße, die durch verstärkte CO₂-Belastung aber auch durch andere klimatische Stressfaktoren (z. B. städtische Umweltbedingungen) oder extreme Trockenheit in größerem Maße von den Pflanzen freigesetzt werden. Bei bestimmten Menschen können diese Pollenallergene zu immunologischen Überreaktionen führen.

Ein weiterer Allergie-verstärkender Aspekt ist die Zunahme der Allergenität (d. h. Potenzial zur Auslösung einer allergischen Reaktion) der Pollen. Hierbei spielt der Temperaturanstieg jedoch nicht immer die entscheidende Rolle. Während bei Birkenpollen höhere Temperaturen die Allergenität erhöhen, hat die Temperatur bei Ambrosia keinen Einfluss auf die Allergenität. In Gebieten mit starker Luftverschmutzung reagieren die Pollen mit Luftverschmutzungen wie Ozon oder Feinstaub, wodurch sich die Allergenität erhöht. Durch das Zusammenspiel von Feinstaub und Pollen entstehen allergene Aerosole, die in die Lunge eindringen und Asthma auslösen können.

Die Bedeutung der gestiegenen Pollenmenge und der Zunahme der Allergenität insb. in Städten verdeutlicht die folgende Statistik. Dargestellt ist die Prävalenz für Heuschnupfen. Diese ist zum einen in den Jahren 2010 bis 2019 stetig gestiegen und offensichtlich in größeren Städten größer als in dünn besiedelten ländlichen Kreisen.

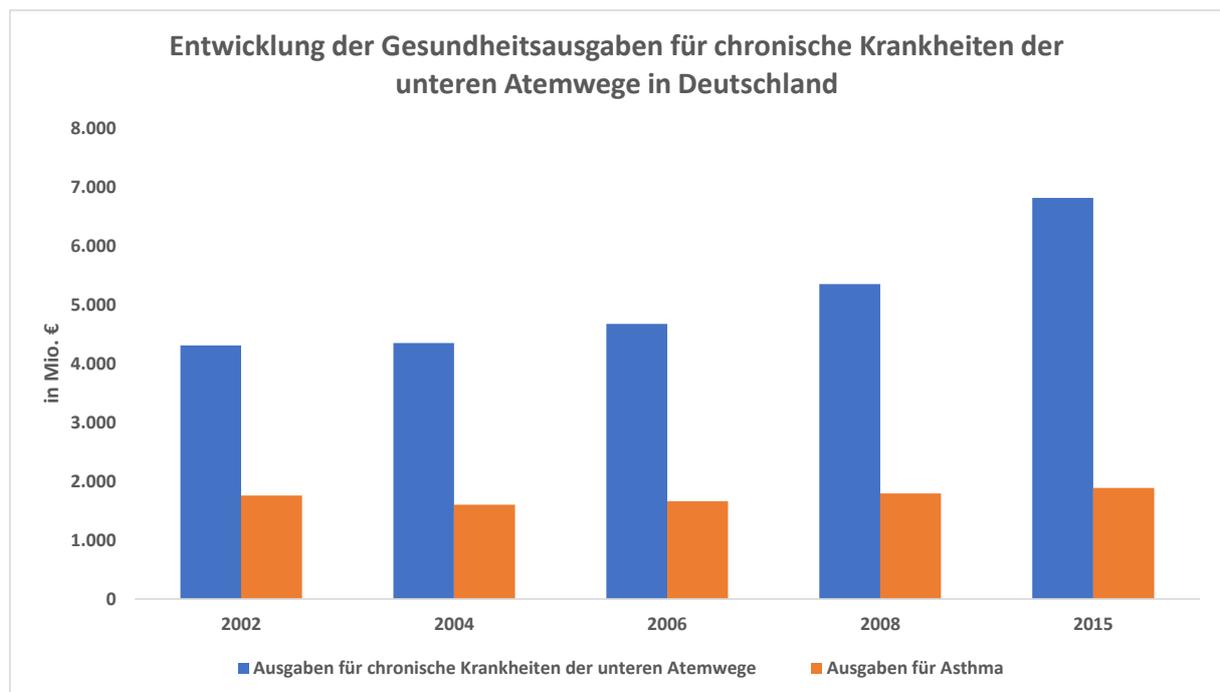


Auch die 12-Monats-Prävalenz von Asthma bronchiale ist in den Jahren 2009 bis 2015 in nahezu allen Altersgruppen gestiegen. Und auch über alle Altersgruppen hat sich die 12-Monats-Prävalenz im angegebenen Zeitraum um rd. 1%-Punkt bzw. 20% erhöht.



Die nachfolgende Grafik verdeutlicht, dass auch die Kosten für chronische Atemwegserkrankungen zwischen 2002 und 2015 um knapp 60% gestiegen sind. Die Ausgaben für Asthma (ICD-10 J45-46) sind zwar auch gestiegen, jedoch nicht in gleichem Maße wie die Gesamtausgaben für chronische Atemwegserkrankungen.

Eventuell machen sich hier die Entwicklung neuer Medikamente bemerkbar, die schwere Verläufe und somit sehr hohe Kosten verhindert.



Insgesamt zeigen sich die Auswirkungen des Temperaturanstiegs an der Entwicklung der Pollensaison mit entsprechend negativen Folgen für die Anzahl der chronischen Atemwegserkrankungen. Zur Reduktion der allergenen Pollen wären z. B. Maßnahmen bei der Stadtplanung (bessere Auswahl der Baumarten bei der Begrünung von Stadtflächen) sowie eine Meldepflicht für Ambrosia zur Eindämmung des Bestandes und der Verbreitung (wie dies z. B. in der Schweiz der Fall ist) anzuraten.

2.3.2. Luftverschmutzung

Luftverschmutzung ist weltweit für rd. 7 Mio. Todesfälle pro Jahr verantwortlich und stellt somit ein erhebliches Problem für die Gesundheit der Menschen dar. Zwischen dem Klimawandel und der Luftverschmutzung besteht ein enger Zusammenhang. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe sind Hauptverursacher der CO₂-Emissionen und somit ein Hauptgrund für den Klimawandel. Zudem setzen sie aber auch in großem Maße Luftschadstoffe frei. Diese sind – neben den direkten negativen Folgen auf die menschliche Gesundheit – auch noch für die globale Erwärmung verantwortlich.

Trocken-heiße Witterung, die voraussichtlich durch den globalen Temperaturanstieg aufgrund des Klimawandels, in den nächsten Jahren zunehmen wird, intensiviert zum einen die Bildung von Ozon (O₃) und erhöht zum anderen die Belastung durch Feinstaub (PM_{2,5}) (zumeist noch verstärkt durch hohe Umweltbelastungen durch den Straßenverkehr sowie andere Ursachen wie Waldbrände). Das EuroHeat-Projekt hat die Auswirkungen des Hitzesommers 2003 untersucht und fest-

gestellt, dass die erhöhte Mortalität an Hitzetagen durch eine erhöhte Konzentration von Ozon und Feinstaub verstärkt wird. Diese Kombieffekte treffen insb. die Risikogruppen der älteren Menschen, Kleinkinder sowie chronisch Kranke. Zudem treffen Luftschadstoffe v. a. Menschen in städtischen Ballungsräumen. Neben einer Verkürzung der Lebenserwartung können auch Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen zu Arbeitsausfällen und Fehlzeiten in der Schule führen. Insb. Kinder sind anfällig für die Folgen der Luftverschmutzung, da es in jungen Altern zu verminderter Lungenfunktion kommen kann, die auch im Erwachsenenalter noch anhalten kann.

Um die Folgen der Luftverschmutzung quantitativ beurteilen zu können, bietet sich z. B. die Meta-Analyse „Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review“ von G. Hoek et. al. (2013) an. Hierbei wurden die Auswirkungen einer langfristigen Exposition ggü. feinen und groben Partikeln (PM_{2,5} bzw. PM₁₀), Stickstoffdioxid (NO₂) und elementarem Kohlenstoff in Bezug auf die Sterblichkeit durch alle Ursachen, Herz-Kreislaufkrankungen sowie Atemwegserkrankungen und Lungenentzündungen untersucht.

Die globalen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

<i>Luftschadstoff</i>	<i>Anstieg des Luftschadstoffs</i>	<i>Todesursache</i>	<i>Veränderung im RR (95% Konfidenzintervall)</i>
PM _{2,5} /PM ₁₀	10 µg/m ³	alle Ursachen	6,2% (4,1% - 8,4%)
PM _{2,5} /PM ₁₀	10 µg/m ³	kardiovaskuläre Erkrankungen	10,6% (5,4% - 16,0%)
PM _{2,5} /PM ₁₀	10 µg/m ³	Atemwegserkrankungen	2,9% (-5,9% - 12,6%)
EC	1 µg/m ³	alle Ursachen	6,1% (4,9% - 7,3%)
NO ₂	10 µg/m ³	alle Ursachen	5,5% (3,1% - 8,0%)

Die Ergebnisse basieren auf einer Vielzahl von einzelnen Studien aus verschiedenen Ländern mit unterschiedlichen Bevölkerungsmerkmalen und Umweltbelastungen (z. B. Partikelzusammensetzungen und Verbreitungen). Zudem unterscheiden sich die Studien auch in ihrer methodischen Vorgehensweise. Daher kann man eine recht hohe Volatilität der Ergebnisse beobachten.

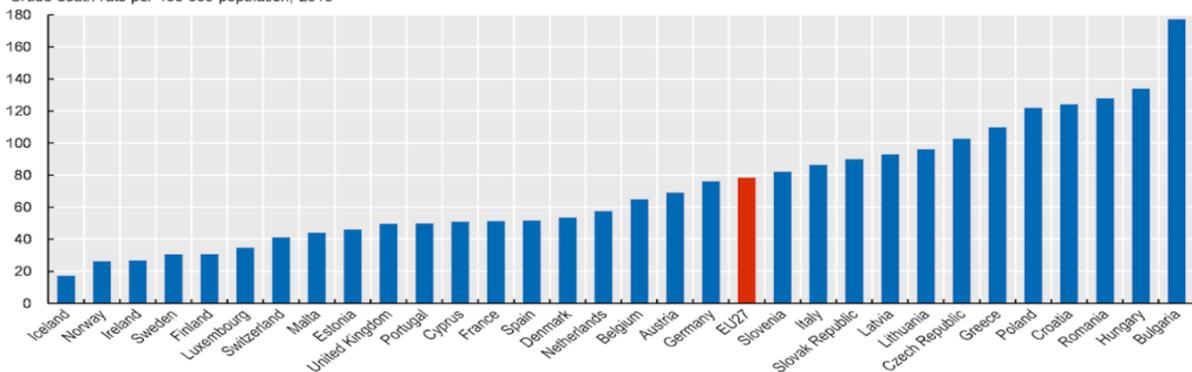
Auch für Deutschland wurden zwei Studien durchgeführt („Long-term exposure to ambient air pollution and cardiopulmonary mortality in women“, U. Gehring et. al. (2006) und „Long-term exposure to NO₂ and PM₁₀ and all-cause and cause-specific mortality in a prospective cohort of women“, J. Heinrich et. al. (2013)), die zu folgenden Ergebnissen geführt haben:

Luftschadstoff	Anstieg des Luftschadstoffs	Todesursache	Veränderung im RR (95% Konfidenzintervall)
PM10	10 µg/m ³	alle Ursachen	12% (-9% - 37%) / 22% (6% - 41%)
PM10	10 µg/m ³	kardiovaskuläre Erkrankungen	52% (8% - 114%) / 61% (26% - 104%)
NO2	10 µg/m ³	alle Ursachen	11% (1% - 21%) / 11% (4% - 18%)
NO2	10 µg/m ³	kardiovaskuläre Erkrankungen	36% (14% - 63%) / 32% (18% - 47%)

Die Studien haben kaum Unterschiede bei der Auswirkung auf die Sterblichkeit zwischen Männern und Frauen gezeigt. Bei Personen mit geringer Bildung und bei fettleibigeren Personen war der Effekt auf die Sterblichkeit größer, wobei neuere Studien einen schwächeren Zusammenhang mit dem Bildungsstatus aufzeigen.

Die nachfolgende Grafik zeigt einen Vergleich der vorzeitigen Sterblichkeit aufgrund der Feinstaubbelastung (PM_{2,5}) auf. Deutschland liegt dabei mit einer Sterblichkeitsrate von rd. 0,08% im europäischen Durchschnitt. Dies bedeutet aber auch, dass es in Deutschland jährlich über 60.000 vorgezogene Todesfälle aufgrund von Feinstaubbelastung gibt.

Figure 2.5. Premature death rates attributable to outdoor air pollution (PM_{2.5}) are generally the highest in Central and Eastern Europe, and lowest in Northern Europe
Crude death rate per 100 000 population, 2018



Note: The EU average is weighted.

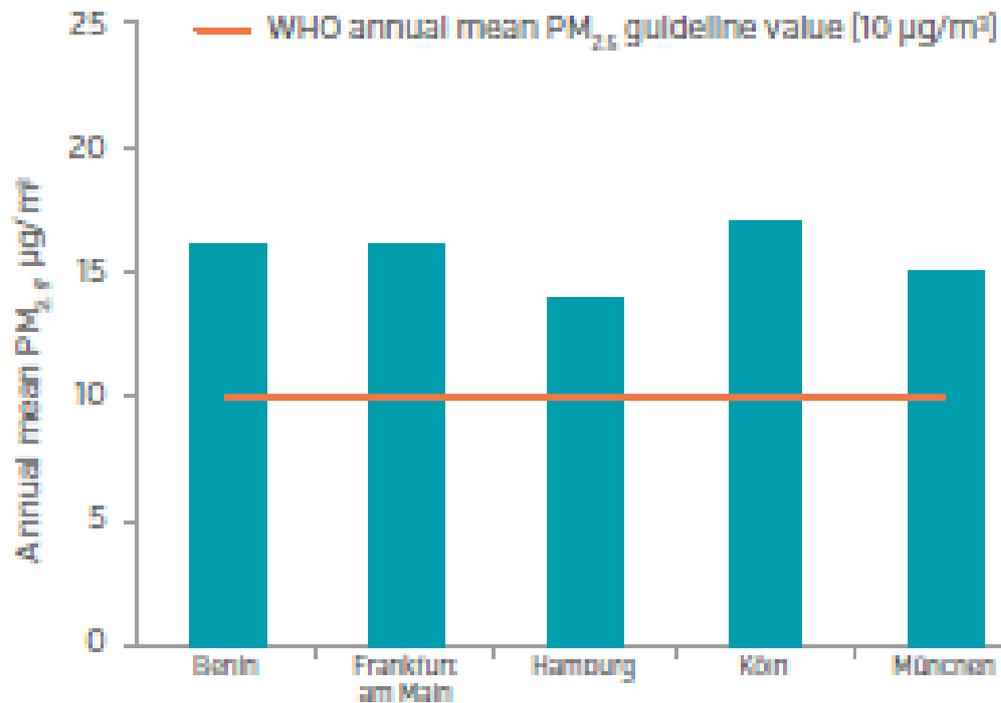
Source: Based on European Environment Agency (2020[2]), *Air quality in Europe – 2020 report*.

StatLink <https://stat.link/yqfurb>

Betrachtet man nun die deutschen Großstädte, so zeigt eine Auswertung der WHO aus dem Jahr 2013, dass alle fünf deutschen Millionenstädte über dem von der WHO empfohlenen Grenzwert für PM_{2.5} i. H. v. 10 µg/m³ lagen.

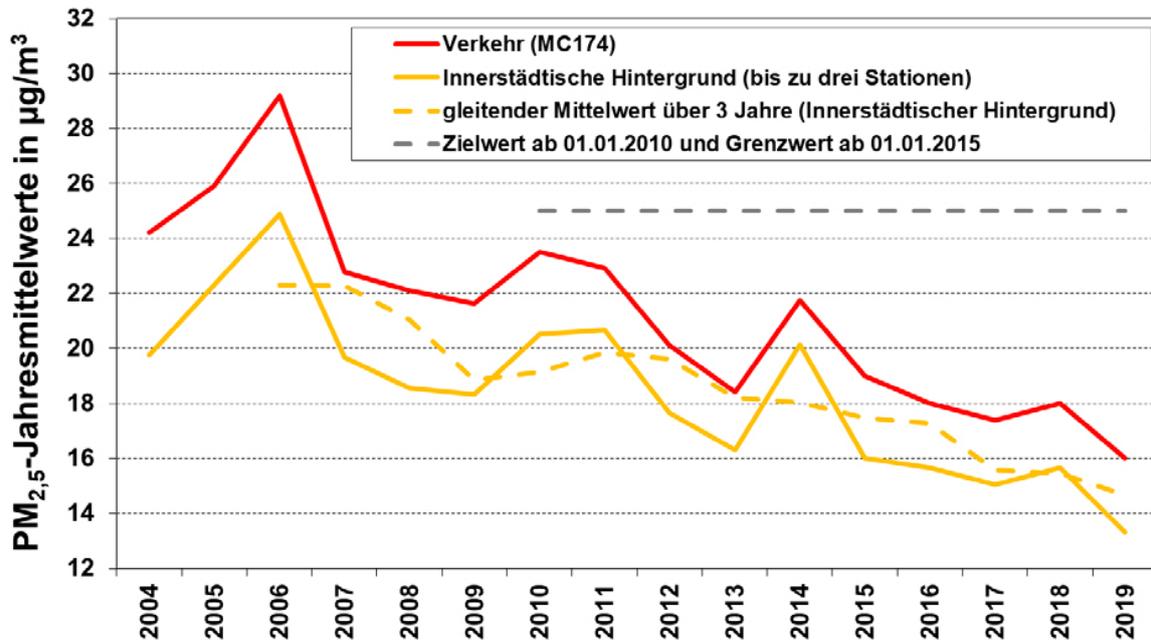
OUTDOOR AIR POLLUTION EXPOSURE

Outdoor air pollution in cities in Germany
annual mean $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 2013



Allerdings hat sich die Situation in den letzten Jahren verbessert. Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung in Berlin bis zum Jahr 2019.

Langjährige Entwicklung der Partikel PM_{2,5}-Belastung



Eine ähnliche Entwicklung kann man in Köln beobachten. Hier hat sich die Feinstaubbelastung von 18 µg/m³ (Messstation: Turiner Straße) bzw. 16 µg/m³ (Messstation: Köln-Chorweiler) im Jahr 2013 auf 13 bzw. 10 µg/m³ im Jahr 2019 verbessert (Quelle: LANUV).

Trotzdem kann man sich natürlich fragen, wie man den jährlichen Anteil an Todesfällen aufgrund der Luftverschmutzung quantitativ abschätzen kann. Die Ergebnisse der obigen Studien bilden hierfür eine gute Basis.

Eine Maßzahl zur Beschreibung des Sterblichkeitsanstiegs aufgrund eines Anstiegs der Feinstaubbelastung ist das relative Risiko (RR, relative risk). Ein üblicher Ansatz für das RR wird über eine Exponentialfunktion beschrieben (s. auch Kapitel zur hitzebedingten Mortalität), d. h. es gilt:

$$RR(x) = \exp(\beta \cdot x)$$

Dabei hängt das RR von der jeweiligen Feinstaubbelastung x ab.

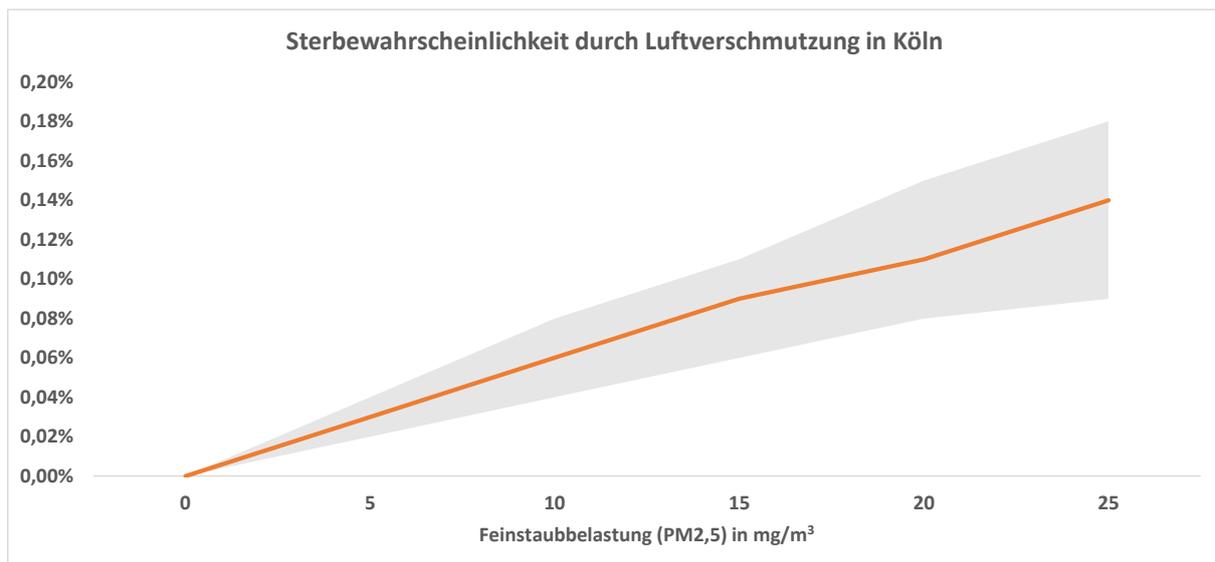
Bezogen auf alle Todesursachen ist aus der oben genannten Meta-Analyse bekannt, dass ein Anstieg um 10 µg/m³ PM_{2,5} zu einem Sterblichkeitsanstieg um 6,2% führt, d. h.:

$$RR(10) = \exp(\beta \cdot 10) = 1,062 \Rightarrow \beta = \frac{\ln(1,062)}{10} = 0,00601539$$

Aus dem relativen Risiko lässt sich dann auch der Anteil der Toten durch Luftverschmutzung (AF, attributable fraction) ermitteln:

$$AF(x) = \frac{RR(x) - 1}{RR(x)} = 1 - \exp(-\beta \cdot x)$$

Um die Effekte zu verdeutlichen, wird in der folgenden Tabelle die Anzahl der Toten aufgrund der Luftverschmutzung für eine Gesamtbevölkerung von 1 Mio. dargestellt. Dies entspricht fast exakt der Einwohnerzahl von Köln. In Köln gab es im Jahr 2019 (also vor Ausbruch der Corona-Pandemie) insgesamt rd. 10.000 Sterbefälle. Unter den getroffenen Annahmen liegt der Anteil aller Sterbefälle in Köln, der auf die Feinstaubbelastung zurückzuführen ist, bei knapp 7,5% (752 Todesfälle). Die Sterbewahrscheinlichkeit bezogen auf die Luftverschmutzung beträgt 0,08% und entspricht somit etwa dem von der European Environment Agency ermittelten Durchschnittswert für Deutschland. Betrachtet man die Sterbefälle, die aufgrund der Überschreitung des WHO-Richtwertes von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entstehen, so ergibt sich ein Anteil von rd. 1,8% an vermeidbaren Todesfällen bedingt durch Luftverschmutzung.



Eine analoge Berechnung kann man für die Sterblichkeit aufgrund von Herz-Kreislauferkrankungen anstellen. Auf Basis der Ergebnisse der obigen Meta-Analyse ergibt sich ein β von 0,010075. Von den im Jahr 2019 rd. 3.000 Todesfällen in Köln, die an Herz-Kreislauferkrankungen gestorben sind, ist somit ein Anteil von rd. 12,3% (368 Todesfälle) auf die Feinstaubbelastung zurückzuführen (bei einer Feinstaubbelastung wie im Jahr 2013 hätte der Anteil noch rd. 15,75% betragen). Die Sterblichkeitsrate bei auf Luftverschmutzung zurückzuführende Herz-Kreislauferkrankungen beträgt 0,04%. Somit ist der Anteil der Todesfälle aufgrund von Herz-Kreislauferkrankungen insgesamt etwa 30%, bei den auf Luftverschmutzung zurückzuführenden Todesfällen jedoch rd. 50%. Der Anteil der vermeidbaren Todesfälle bei Unterschreitung des WHO-Schwellenwertes liegt bei rd. 3%. Allerdings liegt auch hier die Schwankungsbreite bei der Sterbewahrscheinlichkeit zwischen 0,02% und 0,05%, so dass die Ergebnisse mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet sind.

Für weitere quantitative Analysen bietet sich das WHO-Tool AirQ+ an. Dieses wurde beispielsweise auch im Rahmen der französischen Aufsichtsstudie genutzt, um ein eigenes Luftverschmutzungs-Szenario im Rahmen des Klima-Stresstests für französische Krankenversicherer zu erstellen. Basis für die Ermittlung der Szenarien bildet „Conséquences du changement climatique sur la pollution de l'air et

impact en assurance de personnes“ (Yannick Drif, 2020). Die Szenarien beschreiben die Entwicklung von Krankheiten im Zusammenhang mit der Verschlechterung der Luftqualität (Feinstaubbelastung) in städtischen Gebieten und aufgrund der Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen. Als gefährdete Bevölkerungsgruppen werden ältere Menschen und Kleinkinder angesehen, weshalb eine Segmentierung der VN-Bestände erforderlich ist. Die Verschlechterung der Luftqualität in städtischen Regionen geht mit einem Anstieg von Ozon, Stickstoffdioxid und Feinstaub in Verbindung mit höheren Temperaturen einher. Die Folgen reichen von schweren (chronischen) Atemwegserkrankungen (Asthma, verringerter Lungenfunktion) bis hin zu Todesfällen durch akute Atemnot, Herz-Kreislauferkrankungen oder Lungenkrebs. In diesem Aufsichts-Stresstest werden Ansätze pro Metropol-Region sowie für Frankreich insgesamt auf die Sterblichkeit, Gesundheitskosten und Arbeitsunfähigkeit getroffen.

Die Ergebnisse des Stresstest lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Auswirkungen der Luftverschmutzung sind in Ballungsräumen besonders groß (Bevölkerungswanderung zu beachten). Die geringere Steigerung bei der Ile-de-France liegt an einem sehr hohen Vergleichswert im Jahr 2019.
- Der Anstieg der Leistungen liegt zumeist über dem Durchschnitt für das gesamte Land (110%).

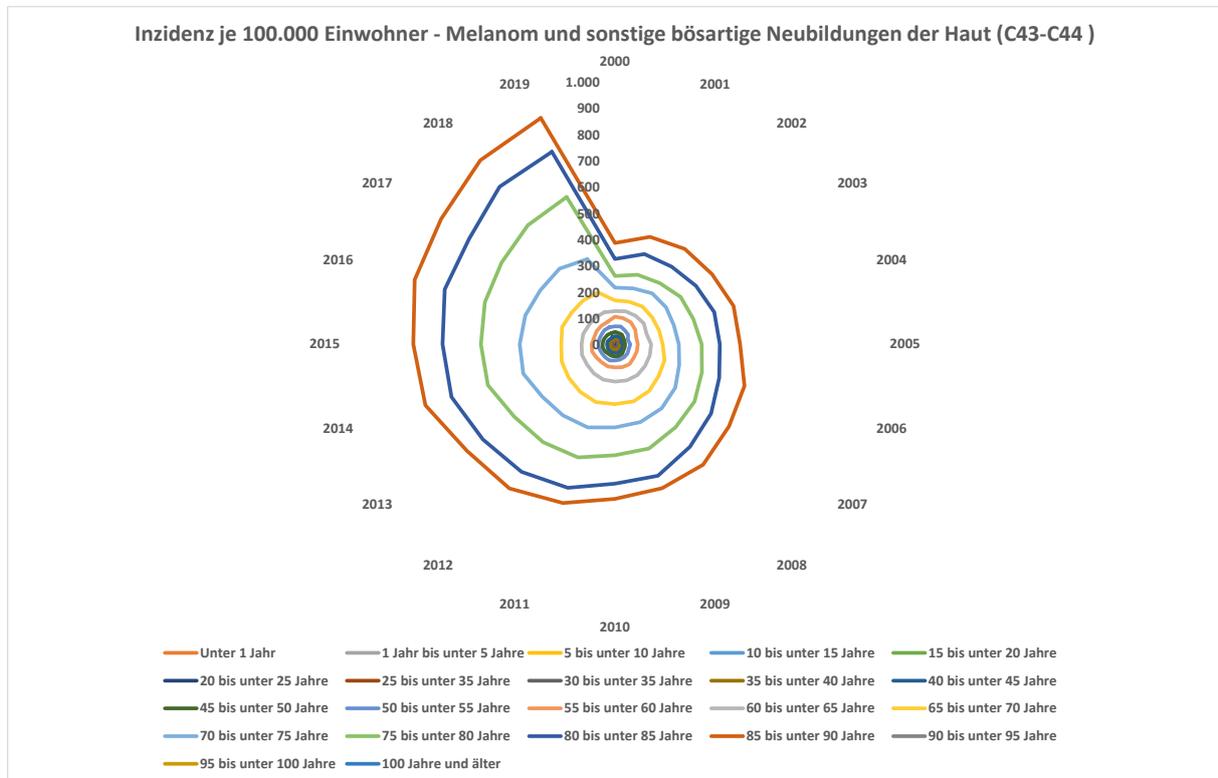
2.4. UV-Strahlung

Ein weiterer wesentlicher Umwelteinfluss auf den menschlichen Körper und die menschliche Gesundheit stellt die UV-Strahlung dar. Sie hat Einfluss auf die Haut und die Augen und kann im schlimmsten Fall zu schweren Erkrankungen wie Hautkrebs und Katarakt (grauer Star) führen.

In der Ozonschicht, die sich in 15 bis 30 km Höhe befindet, wird 99% der UV-Strahlung, die auf die Atmosphäre trifft, absorbiert. Dadurch werden alle Lebewesen auf der Erde vor dieser sehr energiereichen Strahlung, die die Zellen beschädigt, geschützt. Sehr kurzwellige UV-C wird dabei aufgrund spezieller chemischer Reaktionen praktisch vollständig absorbiert. Die langwelligere und energiereiche UV-B-Strahlung, die aufgrund ihrer krebserregenden Wirkung als Hauptrisikofaktor für die Entstehung von Hautkrebserkrankungen angesehen wird, wird teilweise durch die Ozonschicht gefiltert. Die weniger energiereiche UV-A-Strahlung wird durch die Ozonschicht kaum gefiltert und gelangt bis zur Erdoberfläche. Auch UV-A-Strahlung ist für die Bildung von Hautkrebs verantwortlich.

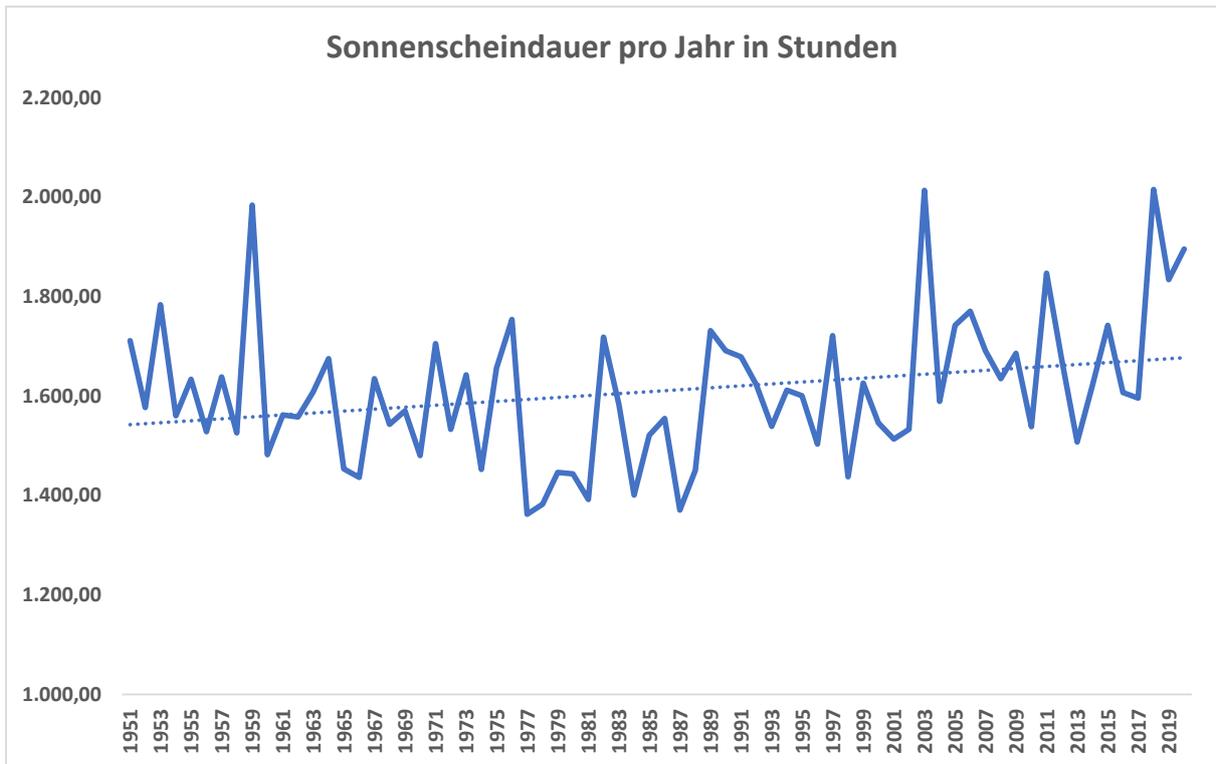
Die Ozonschicht bildet nun insbesondere für die UV-B-Strahlung ein Schutzschild. In den letzten Jahrzehnten hat die Dicke der Ozonschicht abgenommen, was zu einer stärkeren UV-B-Strahlung am Boden geführt hat. Grund für die Abnahme der Ozonschichtdicke waren insbesondere die verstärkte Nutzung ozonzerstörender Substanzen wie v. a. Flurchlorkohlenwasserstoff (FCKW). Dies hat in den letzten Jahren – neben Verhaltensaspekten – zu einer deutlichen Zunahme an Hautkrebserkrankungen in Deutschland geführt hat (s. „UV-induzierte DNA-Schäden und Hautkrebs“, R. Greinert, 2008). Mit mehr als 200.000 Neuerkrankungen pro Jahr (in 2018: malignes Melanom der Haut (ICD-10 C43) 22.890 Neuerkrankungen,

nicht-melanotischer Hautkrebs (heller Hautkrebs) (ICD-10 C44) 199.430 Neuerkrankungen) ist Hautkrebs die häufigste Krebserkrankung in Deutschland. Die nachfolgende Grafik zeigt die Entwicklung der Krankenhausbehandlungen aufgrund einer Hautkrebserkrankungen in den Jahren von 2000 bis 2019. Dabei ist die deutliche Zunahme der Krankheitsfälle zu erkennen, insbesondere in den Altern ab 70 Jahre.

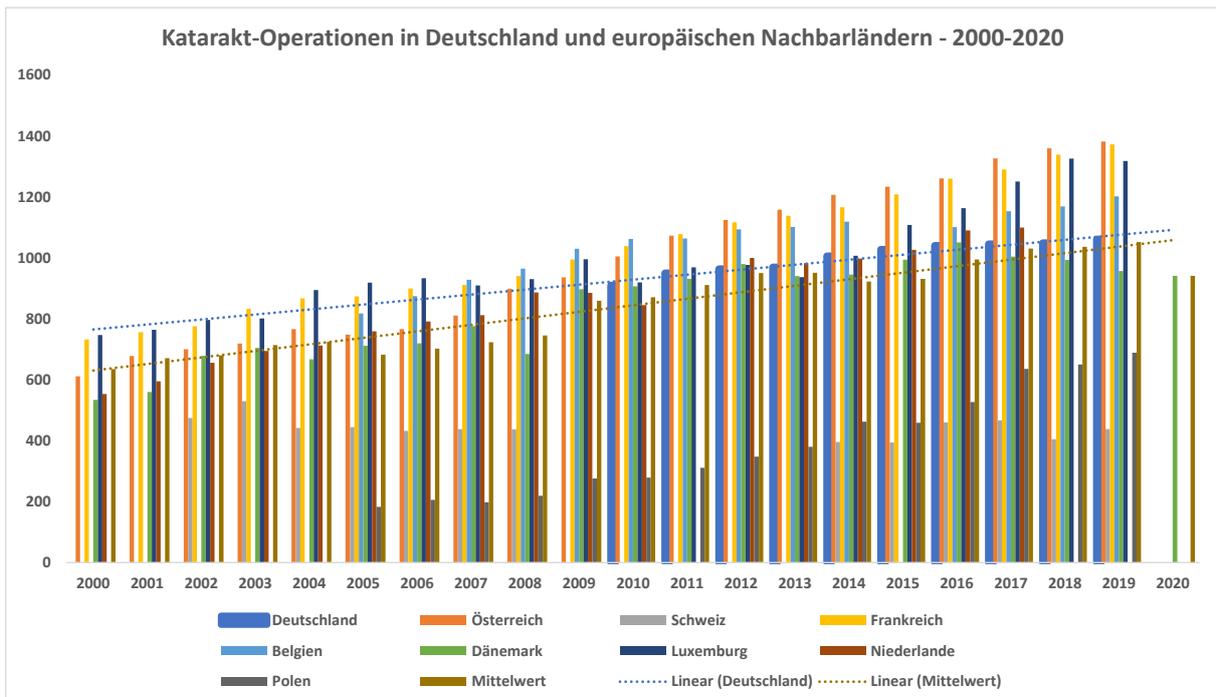


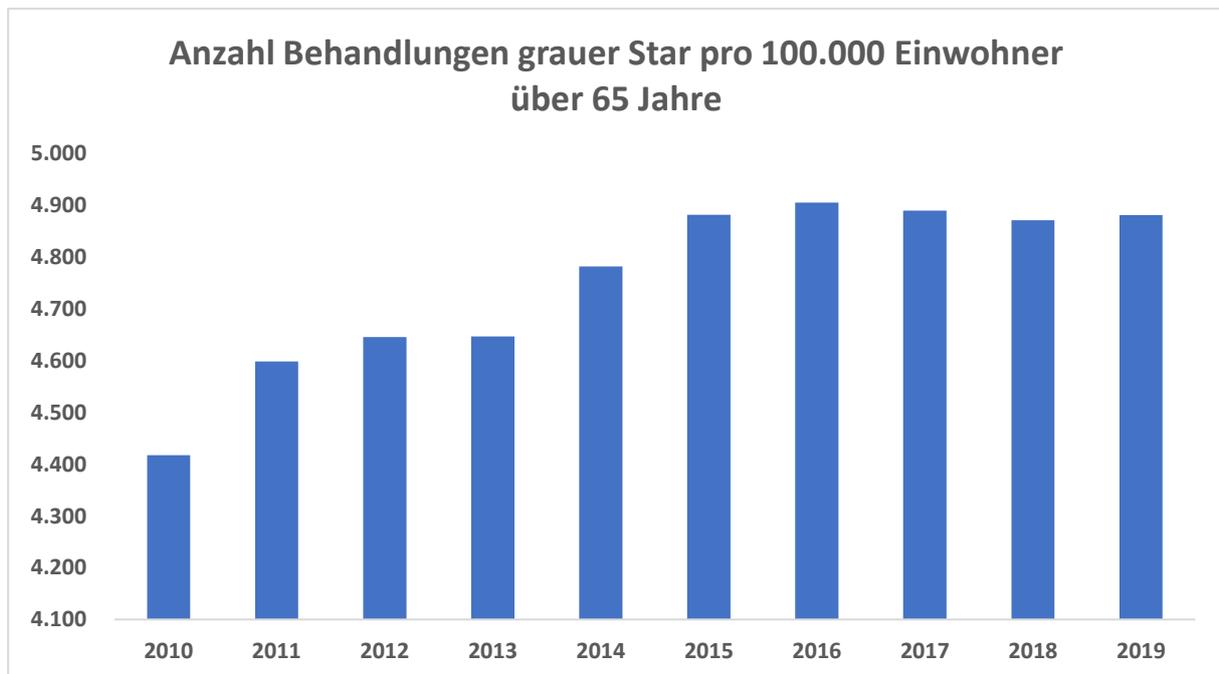
Neben dem Anstieg des Hautkrebsrisikos entsteht durch eine Zunahme der UV-Strahlung auch eine Zunahme des grauen Stars (Katarakt). Die Linse des Auges absorbiert **UV-Strahlung**, um die empfindliche Netzhaut zu schützen. Sie bildet sozusagen einen Schutzschild. Dennoch ist auch sie verwundbar. Zu starke **UV-Strahlung** über längere Zeit führt zu einer Zerstörung der Eiweiße, aus der die Linse besteht - sie wird trüb.

Die folgende Grafik zeigt die Veränderung der Sonnenscheindauer pro Jahr in Deutschland von 1951 bis 2020. Die durchschnittliche Anzahl der Sonnenstunden im Jahr hat sich in diesem Zeitraum um rd. 130 Stunden erhöht.



Die folgenden beiden Grafiken stellen die Entwicklung der Katarakt-Operationen bzw. Behandlungen in den letzten zwei Jahrzehnten dar und zeigen einen deutlichen Anstieg.





Quelle: OECD, eigene Berechnungen

Natürlich werden die Ergebnisse auch durch die Alterung der Bevölkerung überlagert, was aber nicht den Anstieg der Katarakt-Operationen in den letzten 10 Jahren erklärt.

Neben den dargestellten negativen Folgen sei auch darauf hingewiesen, dass eine erhöhte UV-B-Strahlung auch die Vitamin-D-Produktion im Körper anregt, wodurch es zu positiven Effekten auf die Gesundheit kommen kann (z. B. Rückgang des Risikos an Osteoporose zu erkranken, Reduktion des Herzinfarktrisikos).

Um die Schädigung der Ozonschicht aufzuhalten, wurden bereits im letzten Jahrhundert politische Maßnahmen ergriffen. Hier spielt insb. das Montrealer Protokoll aus dem Jahr 1987 eine entscheidende Rolle, durch das die Emission ozonzerstörender Substanzen reglementiert wurde. Da die beschlossenen Maßnahmen sehr konsequent umgesetzt wurden, wurde bisher allgemein mit einer Regeneration der Ozonschicht bis zur Mitte des aktuellen Jahrhunderts gerechnet.

Allerdings gibt es neue Untersuchungen von Forschern des Bremerhavener Alfred-Wegener-Instituts (<https://www.nature.com/articles/s41467-021-24089-6>), die den Einfluss des Klimawandels auf die Ozonschicht untersucht haben. Dabei hat sich gezeigt, dass bei einer ungebremst fortschreitenden globalen Erwärmung die eigentlich erwartete Erholung der Ozonschicht über der Arktis ausbleiben könnte. Im Jahr 2020 haben die Forscher sogar den bisher stärksten jemals aufgetretenen Ozonabbau über der Arktis gemessen. Zu dem Ozonabbau über der Arktis kommt es, wenn sich die Stratosphäre im Bereich der Ozonschicht stark abkühlt. Verantwortlich für diese Abkühlung sind dieselben Treibhausgase, die auch an der Erdoberfläche zur globalen Erwärmung führen. Zudem tragen vermutlich auch durch den Klimawandel ausgelöste Veränderungen im Windsystem zu den tieferen Temperaturen im Polarwirbel bei. Die Folgen hiervon sind u. a. auch in Mitteleuropa

spürbar, denn es kommt dadurch an einigen Tagen im Frühjahr zu einer reduzierten Ozonschicht, was in diesen Tagen zu einer erhöhten UV-Strahlung mit den beschriebenen negativen Folgen auf das Hautkrebsrisiko führen kann.

Eine kurzfristig drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen kann zu einer bald einsetzenden und dauerhaften Regeneration der Ozonschicht führen.

Um das gesundheitliche Risiko durch den Rückgang der Ozonschicht hinzuweisen, gibt es mehrere Simulationen zur Entwicklung von Hautkrebsfällen in Mitteleuropa (Ozone layer – climate change interactions. Influence on UV levels and UV related effects. Summary report of OCCUR (Ozone and Climate Change interaction effects for Ultraviolet radiation and Risks), G. Klefkens et al. 2002) sowie Kataraktfällen in den USA (The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change, M. Norval et al. 2011). Dabei zeigt sich, dass die Zunahme an Hautkrebsfällen in Mitteleuropa noch mehrere Jahrzehnte anhalten wird. Die Anzahl der Kataraktfälle in den USA wird bis zum Jahr 2050 um 1,3-6,9% zunehmen. Daher ergibt sich hieraus, insb. auch im Hinblick auf die demographische Entwicklung in Deutschland, ein erhebliches Risiko für einen Anstieg der Gesundheitskosten.

3. Zusammenfassung und weitere Aspekte

Der durch menschliches Handeln ausgelöste Klimawandel hat sich längst zur Klimakrise entwickelt. Ein sofortiges und drastisches politisches Umsteuern ist zwingend erforderlich, um die unausweichlichen eklatanten Folgen noch eindämmen zu können. Erforderlich sind hierfür sofortige Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Um das 1,5°C-Ziel des Pariser Abkommens bis 2050 mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% zu erreichen, steht ab Beginn 2020 noch ein CO₂-Budget von insgesamt 500 Gt CO₂ zur Verfügung. Bei einem aktuellen weltweiten Verbrauch von jährlich knapp 37 Gt CO₂ ist das Budget spätestens im Jahr 2035 verbraucht. Die Folgen aus der daraus resultierenden globalen Erwärmung wären das Erreichen von sogenannten Kipp-Punkten, die voraussichtlich sehr weitreichende Folgen für unser Ökosystem und somit auch für die Menschen hätten. Zu den weltweiten absehbaren Folgen gehören das Abschmelzen der Gletscher, ein Anstieg der Meeresspiegel, die Zunahme von Dürre- und Hitzeperioden sowie das häufigere Auftreten von Extremereignissen wie Hochwasser, Stürme und Überschwemmungen, die erhebliche Verwüstungen anrichten können. Hinzu kommen die negativen Folgen für das Ökosystem. Viele Tier- und Pflanzenarten sind bedroht oder bereits ausgestorben. Auch die Lebensräume der Tiere und Pflanzen verändern sich, wodurch neuartige Risiken für die Gesundheit der Menschen entstehen können. Durch den Temperaturanstieg verringert sich der Sauerstoffgehalt in den Ozeanen, was das Risiko unumkehrbarer Verluste von Meeres- und Küstenökosystemen erhöht.

Eine weitere direkte Folge der Veränderungen unserer Ökosysteme wäre, dass die ausreichende weltweite Versorgung mit Lebensmitteln aufgrund des Rückgangs der Ernteerträge von Getreidepflanzen wie Mais, Reis und Weizen nicht mehr gewährleistet werden kann. Besonders betroffenen wären die benachteiligten und nicht so gut entwickelten Bevölkerungsgruppen, die von landwirtschaftlichen und küstengeprägten Lebensgrundlagen abhängig sind. Durch den Anstieg der Meeresspiegel werden Küstenregionen und kleinere Inselstaaten überflutet. Somit wird die Anzahl der Menschen, die sowohl klimabedingten Risiken ausgesetzt als auch armutsgefährdet sind, deutlich zunehmen. Es wird voraussichtlich zu massiven Migrationsbewegungen – insbesondere auch nach Europa – kommen.

Auch für Deutschland werden die Folgen des Klimawandels deutlich spürbar werden. Bereits in den letzten zwei Jahrzehnten ist der Anstieg der Durchschnittstemperatur sichtbar und die drei heißesten Sommer liegen alle in diesem Jahrhundert (2003, 2018 und 2019).

Im IPCC AR6 wird sehr deutlich darauf hingewiesen, dass durch die globale Erwärmung die Wahrscheinlichkeit für hitzebedingte Extremereignisse deutlich steigen wird.

Dabei geht es nicht nur darum, dass extreme Wetterereignisse häufiger auftreten, sondern es ist auch mit einer höheren Intensität der Ereignisse zu rechnen. Somit ist es wahrscheinlicher, dass es zu außergewöhnlicher Trockenheit oder extremen

Starkregen mit Überschwemmungen kommen wird. Die Zahl der extremen Wetterereignisse in Deutschland hat sich in den vergangenen 50 Jahren mehr als verdreifacht.

Die extremen Wetterverhältnisse stellen ein Risiko für die Gesundheit des Menschen dar. Umfragen in Deutschland belegen sehr deutlich, dass das Wohlbefinden der Menschen bei extremer Hitze leidet.

Besonders betroffen sind dabei ältere und kranke Menschen sowie Kinder. Betrachtet man die demographische Entwicklung in Deutschland in den nächsten 30 Jahren²⁵, so wird deutlich, dass die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels auf eine immer älter werdende Bevölkerung treffen werden, wodurch die finanziellen und wirtschaftlichen Risiken des Klimawandels noch verstärkt werden.

Während die Hitzewellen im Sommer deutlich häufiger werden, werden die Kälteperioden im Winter immer kürzer mit entsprechenden Folgen auf die Ökosysteme und Veränderungen der Lebensbedingungen von Pflanzen und Tieren. Für bestimmte Tier- und Pflanzenarten können die Lebensräume bedroht werden, andere wiederum können in Deutschland zukünftig heimisch werden. Diese Neuansiedlung birgt ein potenzielles Gesundheitsrisiko für den Menschen (z. B. können sich Infektionskrankheiten wie Malaria und Denguefieber auch hierzulande ausbreiten) sowie damit verbundene wirtschaftliche Kosten (z. B. durch Zunahme der Arbeitsunfähigkeit). Aber auch die extremen Wetterereignisse haben einen negativen Einfluss auf die Wirtschaft. Extreme Wetterereignisse können zu Versorgungsengpässen führen (z. B. Ernteaussfällen aufgrund von extremer Trockenheit, Schwierigkeiten beim Transport von Rohstoffen durch Einschränkungen im Schiffverkehr).

In unserem Bericht haben wir die gesundheitlichen Folgen

- durch extreme Hitzeereignisse (Mortalität und Morbidität)
- durch Zunahme von Infektionskrankheiten
- durch Pollen, Allergien und Luftverschmutzung
- durch UV-Strahlung

dargestellt und quantitativ bewertet.

Alle diese Auswertungen machen deutlich, dass die Klimakrise ein sofortiges Handeln erfordert, um die physischen Risiken (akute und chronische) abzumildern.

Es sei hier allerdings auch darauf hingewiesen, dass auch der Übergang auf eine CO₂-neutrale Wirtschaft, die zur Abwendung der beschriebenen Folgen erreicht werden muss, nicht ohne Risiken für die Krankenversicherer in Deutschland ist. Hierbei handelt es sich um die sogenannten „Transitorischen Risiken“. Politische Maßnahmen wie z. B. die Einführung eines CO₂-Preises, um den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen zu beschleunigen, haben Auswirkungen auf die Profitabilität von

²⁵ Der Altenquotient, der das zahlenmäßige Verhältnis von Personen über 64 Jahren zu den Personen zwischen 15 und 64 Jahren abbildet, wird gemäß Bevölkerungsvorausberechnungen der Statistischen Ämter von gut 30% auf über 50% bis zum Jahr 2060 ansteigen. (Projektion der wirtschaftlichen Entwicklung in den Bundesländern 2022 bis 2060: Methodik und Ergebnisse, IWH Technical Reports, No. 1/2022)

Unternehmen (bis hin zu Ausfallrisiken) und den Wohlstand der privaten Haushalte. Insbesondere können ein Anstieg der allgemeinen Inflation (getrieben durch eine Erhöhung der Energiepreise) auch Auswirkungen auf die medizinische Inflation und somit auf die zukünftige Entwicklung der Kopfschäden haben. Zudem werden die Entwicklungen am Kapitalmarkt zu Effekten auf den AUZ und die Entwicklung der Rechnungszinsen führen, was direkten Einfluss auf die Beiträge in der PKV haben wird. Mögliche Szenarien für Inflations- und Kapitalmarktentwicklungen werden u. a. vom NGFS (Network for Greening the Financial System) bereitgestellt, womit Szenariorechnungen auch über sehr langfristige Projektionszeiträume ermöglicht werden. Als letztes sei noch auf das Risiko hingewiesen, das sich aus zukünftig eingeschränkten finanziellen Möglichkeiten der (potenziellen) Versicherungsnehmern ergeben kann. Dies kann sich sowohl in einer verstärkten Nachfrage nach Tarifwechseln bzw. durch Storno als auch in einem Rückgang des zukünftigen Neugeschäfts bemerkbar machen.

In der vorliegenden Ausarbeitung wurde aber bewusst auf diese Themen nicht eingegangen, sondern wir haben uns auf die Darstellung der Folgen der physischen und psychischen Risiken des Klimawandels konzentriert.

Eine allgemeingültige Aussage zur Auswirkung der beschriebenen physischen und psychischen Risiken auf die zukünftige Kopfschadenentwicklung in der PKV ist nicht möglich. Vielmehr hängen die Effekte sehr stark vom jeweiligen Portfolio des PKV-Unternehmens ab. Dies zeigt sich im Übrigen auch in den Ergebnissen des französischen Aufsichtsstresstests. Auch hier ergaben sich für unterschiedliche Regionen und Versicherungsunternehmen deutliche Unterschiede in der Entwicklung der Leistungen und Prämien. Dazu kommt, dass es Kompensationseffekte im Beitrag aus einem Anstieg der Leistungszahlungen auf der einen Seite und einem möglichen Anstieg der klimabedingten Sterblichkeit geben könnte. Unabhängig von einer exakten Prognose der zukünftigen Beitragsentwicklung, scheinen Anpassungsstrategien für die Folgen des Klimawandels unbedingt erforderlich. Dazu gehören z. B. verstärkte Prävention und umweltbewusstes Verhalten (weniger Fleischgenuss, ...), wodurch sich auch das Krankheitsrisiko reduzieren kann.

Insgesamt sollte jedoch evident sein, dass die Komplexität des Themas Klimawandel, die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit durch zahlreiche hier dargestellte unterschiedliche Wirkmechanismen, die Ungewissheit im zukünftigen Verlauf der betroffenen Parameter sowie die gesamtgesellschaftliche Bedeutung eine Beschäftigung mit dem Thema für deutsche Krankenversicherer unabdingbar machen.