ROBERT KOCH INSTITUT



SEPTEMBER 2023
SPECIAL ISSUE S4

GESUNDHEITSBERICHTERSTATTUNG DES BUNDES
GEMEINSAM GETRAGEN VON RKI UND DESTATIS

Journal of **Health Monitoring**

Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen und die psychische Gesundheit – Teil 2 des Sachstandsberichts Klimawandel und Gesundheit 2023

Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen und die psychische Gesundheit – Teil 2 des Sachstandsberichts Klimawandel und Gesundheit 2023

3 *Focus* Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention

35 *Focus* Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel

61 *Focus* Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch veränderte UV-Strahlung

82 *Focus* Auswirkungen des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Deutschland

111 *Focus* Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft

132 *Focus* Scoping Review zu Klimawandel und psychischer Gesundheit in Deutschland – Direkte und indirekte Auswirkungen, vulnerable Gruppen, Resilienzfaktoren

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S4)
DOI 10.25646/11645
Robert Koch-Institut, Berlin

Claudia Winklmayr[1]*,
Franziska Matthies-Wiesler[2,3]*,
Stefan Muthers[4], Sebastian Buchien[5],
Bernhard Kuch[6], Matthias an der Heiden[5]§,
Hans-Guido Mücke[7]§

* geteilte Erstautorenschaft
§ geteilte Letztautorenschaft

[1] Max Delbrück Center für Molekulare Medizin in der Helmholtz-Gemeinschaft (MDC), Berlin
[2] Helmholtz Zentrum München, Neuherberg Institut für Epidemiologie
[3] Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit e. V. (KLUG), Berlin
[4] Deutscher Wetterdienst, Freiburg Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
[5] Robert Koch-Institut, Berlin Abteilung für Infektionsepidemiologie
[6] Stiftungskrankenhaus Nördlingen Abteilung für Innere Medizin/Kardiologie/Intensivmedizin Donau-Ries-Kliniken
[7] Umweltbundesamt, Berlin Abteilung Umwelthygiene

Eingereicht: 05.01.2023
Akzeptiert: 05.06.2023
Veröffentlicht: 06.09.2023

Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention

Abstract

Hintergrund: Der Klimawandel hat in Deutschland bereits zu einer deutlichen Temperaturzunahme geführt. So lag die Mitteltemperatur im vergangenen Jahrzehnt rund 2 °C über dem vorindustriellen Niveau und acht der zehn heißesten Sommer seit Beginn der systematischen Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881 wurden in den letzten 30 Jahren verzeichnet.

Methode: Der Artikel fasst, basierend auf einer selektiven Literaturrecherche und eigenen Auswertungen, den aktuellen Wissensstand zu Hitze und ihren gesundheitlichen Auswirkungen für Deutschland zusammen, geht auf Anpassungsmaßnahmen ein und gibt einen Ausblick auf Umsetzungs- und Forschungsfragen.

Ergebnisse: Hitze kann bestehende Beschwerden wie Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems, der Atemwege oder der Nieren verschlimmern und bei zahlreichen Medikamenten teils schwerwiegende Nebenwirkungen auslösen. Während Hitzeperioden wird regelmäßig ein deutlicher Anstieg der Sterbefälle beobachtet. Bisherige Ansätze zur Abmilderung gesundheitlicher Auswirkungen hoher Temperaturen umfassen z. B. die Hitzewarnungen des Deutschen Wetterdienstes sowie Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen.

Schlussfolgerungen: Die Evidenz zu Gesundheitsauswirkungen von Hitze und das Bewusstsein für die Notwendigkeit von gesundheitsbezogenem Hitzeschutz sind in den letzten Jahren gewachsen, dennoch besteht weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

HITZEWELLEN · MORBIDITÄT · MORTALITÄT · HITZEAKTIONSPLAN · VULNERABEL · GESUNDHEITSSCHUTZ · PRÄVENTION

1. Auswirkungen von Hitze auf die Gesundheit in Deutschland

Temperaturanstieg und eine Zunahme von Hitzeperioden gehören zu den am direktesten wahrnehmbaren Folgen des anthropogenen Klimawandels. Weitere Extremwetterereignisse werden an anderer Stelle in diesem Sachstandsbericht von Butsch et al. [1] diskutiert. Die gesundheitlichen Folgen hoher Temperaturen bis hin zur hitzebedingten Mortalität rücken, auch im internationalen Kontext, zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher und politischer Initiativen [2]. Im ersten Teil dieses Artikels fassen wir den aktuellen Wissensstand zu Hitze und ihren gesundheitlichen Auswirkungen für Deutschland zusammen, im Haupt-

teil gehen wir ausführlich auf in Umsetzung befindliche und empfohlene Anpassungsmaßnahmen ein und geben im dritten Teil einen Ausblick auf sich stellende Umsetzungs- und Forschungsfragen. Diese Zusammenstellung wurde Ende Mai 2023 fertiggestellt und spiegelt den Stand der Maßnahmenumsetzung und Handlungsempfehlungen zu diesem Zeitpunkt. Da das Bewusstsein für die gesundheitlichen Auswirkungen von Hitze und die Notwendigkeit von Gegenmaßnahmen stetig zunehmen, ist es möglich, dass bis zum Publikationszeitpunkt die Umsetzung weiterer Maßnahmen beschlossen wurde und somit einzelnen Empfehlungen bereits nachgekommen wurde.

Infolge des Klimawandels nehmen Temperaturen und Hitzewellen in Deutschland stärker zu als im globalen Mittel.

1.1 Temperaturveränderungen in Deutschland

Der Klimawandel hat bereits in den vergangenen Jahrzehnten zu Temperaturveränderungen in Deutschland geführt. Während die globale Mitteltemperatur über Landflächen im letzten Jahrzehnt (2011–2020) 1,59 °C (90 %-Konfidenzintervall (KI) 1,34–1,83 °C) höher lag als die durchschnittliche Temperatur im Zeitraum 1850–1900 [3], betrug der Temperaturanstieg in Deutschland bereits 2,0 °C (2011–2020 relativ zu 1881–1910, Abbildung 1a). Die Temperaturzunahme hat sich in den Jahrzehnten seit 1990 deutlich verstärkt. Acht der zehn wärmsten Sommer seit Beginn der systematischen Wetteraufzeichnungen in Deutschland (1881) wurden in den letzten 30 Jahren registriert.

Diese Entwicklung zeigt sich auch in der Anzahl heißer Tage (Tage, an denen die Maximaltemperatur 30 °C erreicht: Tmax ≥ 30 °C). Dieser Indikator kann ab Mitte des 20. Jahrhunderts in verlässlicher Genauigkeit deutschlandweit ausgewertet werden. Auch hier konzentriert sich die stärkste Zunahme auf die letzten drei Jahrzehnte (Abbildung 1b). Die Zunahme der heißen Tage betrifft nahezu alle Regionen Deutschlands (Abbildung 1c). Die absolut höchsten Werte treten im Süd-Westen (Oberrheingraben und Rhein-Main-Region) sowie im Osten (Berlin/südl. Brandenburg) auf. Im Süd-Westen wurden in der letzten Dekade regional über 20 heiße Tage pro Jahr verzeichnet, im Osten sind es großflächig über 16 Tage pro Jahr.

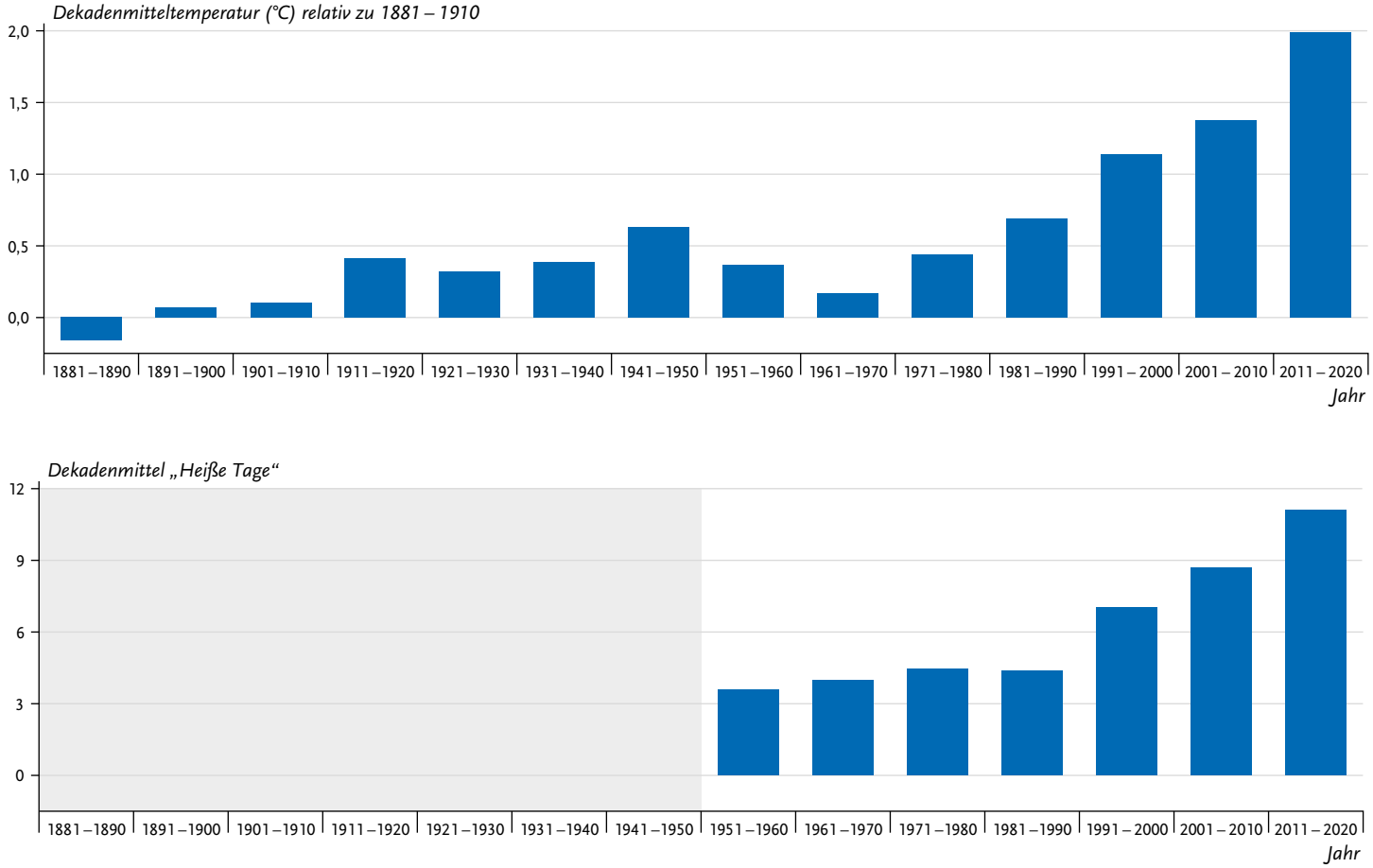
Eine Identifikation außergewöhnlicher historischer Hitzewellen ist sehr stark davon abhängig, wie eine Hitzewelle definiert wird und welche Region betrachtet wird. Eine einheitliche Definition des Begriffs Hitzewelle existiert bislang nicht (Infobox 1). Da Hitzewellen großräumige Ereignisse sind, beschränken sich wissenschaftliche Auswertungen in der Regel nicht auf das Gebiet von Deutschland. Eine interne Auswertung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Region Mitteleuropa (2°–24° O und 45°–55° N), bei der Hitzewellen definiert wurden als Perioden von mindestens drei Tagen Länge, an denen die Maximaltemperatur über dem 98. Perzentil einer Referenzperiode liegt, ermöglicht ein Ranking der Hitzewellen hinsichtlich der betroffenen Fläche, der aufgetretenen Temperaturanomalien und der Dauer. Wenn die kumulierten Temperaturanomalien als Intensitätsmaß verwendet werden, liegt die Hitzewelle des Augusts 2003 auf Platz 1 aller Hitzewellen seit 1950, gefolgt von der Hitzewelle im Juli/August 1994. Die Hitzewelle 2003 war auch eine mit der bislang längsten Dauer, im Oberrheingebiet registrierte man bis zu 53 heiße Tage im gesamten Sommer. Die heißesten Hitzewellen (bezüglich der kumulierten Temperaturanomalien) sind in den Jahren 1994 und 2015 aufgetreten.

Abbildung 1
Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD)

Abbildung 1a (oben)
Veränderung der Dekadenmittel der Jahresmitteltemperatur über Deutschland zwischen 1881 und 2020. Dargestellt sind Anomalien der Dekadenmittel relativ zum Mittel des Zeitraums 1881–1910.

Abbildung 1b (Mitte)
Gebietsmittel der heißen Tage über Deutschland seit 1951. Dargestellt sind Dekadenmittel, vor 1951 liegen keine Gebietsmittel für die Anzahl heißer Tage vor.

Abbildung 1c (unten)
Regionale Verteilung der Anzahl heißer Tage pro Dekade seit 1951. Tagesangaben in der Legende sind auf ganze Zahlen abgerundet.



Infobox 1
Hitzewellen

Eine einheitliche Definition des Begriffs Hitzewelle gibt es bislang weder in Deutschland noch international. In der Literatur existieren zahlreiche Vorschläge, die sich durch die verwendeten meteorologischen Parameter, die Methodik zur Wahl von Schwellenwerten und die Kriterien für die minimale Dauer unterscheiden.

Die möglichen Parameter reichen von einfachen Temperaturgrößen (z. B. Tagesmaximum der Lufttemperatur) über kombinierte human-biometeorologische Indizes (z. B. Gefühlte Temperatur [6]) bis zu komplexen Hitzewellen-Indizes (heatwave magnitude index daily [4]). Mitunter werden die Parameter auch noch einer zeitlichen Mittelung unterzogen (z. B. excess heat factor [7]). Auch eine Kombination verschiedener Parameter (z. B. Tagesmaximum und Tagesminimum der Lufttemperatur) werden vereinzelt verwendet.

Bei der Wahl der Schwellenwerte kann zwischen absoluten (z. B. Tagesmaximum der Lufttemperatur > 30 °C) und relativen Schwellenwerten (z. B. auf Basis von Perzentilen) unterschieden werden [8]. Die minimale Dauer, ab der von einer Hitzewelle gesprochen wird, reicht von zwei Tagen (z. B. [9]) bis zu mehreren Tagen (z. B. fünf Tage [8]).

Die große Bandbreite möglicher Hitzewellendefinitionen erschwert einen Vergleich der Studienlage. Der deutliche negative Effekt von Hitzewellen auf die menschliche Gesundheit lässt sich aber für jede Hitzewellendefinition finden. Im gesamten Artikel verwenden wir den weiter gefassten Begriff „Hitzeperiode", um einen längeren Zeitraum mit stark erhöhten Umgebungstemperaturen ohne nähere Angaben zu Dauer und Intensität zu bezeichnen. Wenn wir uns auf eine bestimmte Hitzewellendefinition beziehen, werden wir dies ausdrücklich erwähnen.

Auch europaweite Vergleichsstudien identifizieren die bezüglich Intensität und Dauer ausgeprägtesten Hitzewellen in Deutschland in den Jahren 1994 und 2003. An dritter Stelle finden sich (je nach Kriterium) die Jahre 2006, 2018 oder 2019 [4, 5].

1.2 Weitere Entwicklung gemäß verschiedenen Klimaszenarien

Infolge des Klimawandels werden heiße Tage und Hitzewellen in Deutschland weiter zunehmen. Das Ausmaß der Zunahme ist u. a. abhängig von der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen. Mit Hilfe von regionalen Klimamodellen und unter Annahme von Emissionsszenarien ist es jedoch möglich, die zukünftige Entwicklung und die vorhandenen Unsicherheiten für Deutschland abzuschätzen (siehe auch [10]).

Brienen et al. [11] haben eine solche Abschätzung für die Emissionsszenarien RCP2.6 (Klimaschutzszenario), RCP4.5 (moderates Szenario) und RCP8.5 (weiter-wie-bisher-Szenario) und die Zeiträume 2031–2060 (nahe Zukunft) und 2071–2100 (ferne Zukunft) und einem Ensemble von regionalen Klimamodellen für verschiedene Regionen in Deutschland durchgeführt. Unter RCP8.5 wird die Temperatur bis zum Ende des Jahrhunderts – je nach Region und Jahreszeit – um 3,0 bis 4,2 °C im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 ansteigen (Ensemblemedian). Heiße Tage werden infolge des Klimawandels in den meisten Regionen deutlich zunehmen (Abbildung 2). Im Deutschlandmittel wird die Anzahl heißer Tage unter RCP8.5 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um etwa 18 Tage zunehmen, mit Unsicherheiten zwischen +13 und +28 Tage (Abbildung 2). Regional sind die Zunahmen dabei unterschiedlich, und in manchen Regionen könnte die Anzahl heißer Tage im Mittel auf über 40 Tage pro Jahr ansteigen. Auch die Küsten und höheren Lagen verzeichnen deutliche Zunahmen.

Neben der maximalen Belastung am Tag spielen bei Hitzewellen auch die Bedingungen in der Nacht eine Rolle.

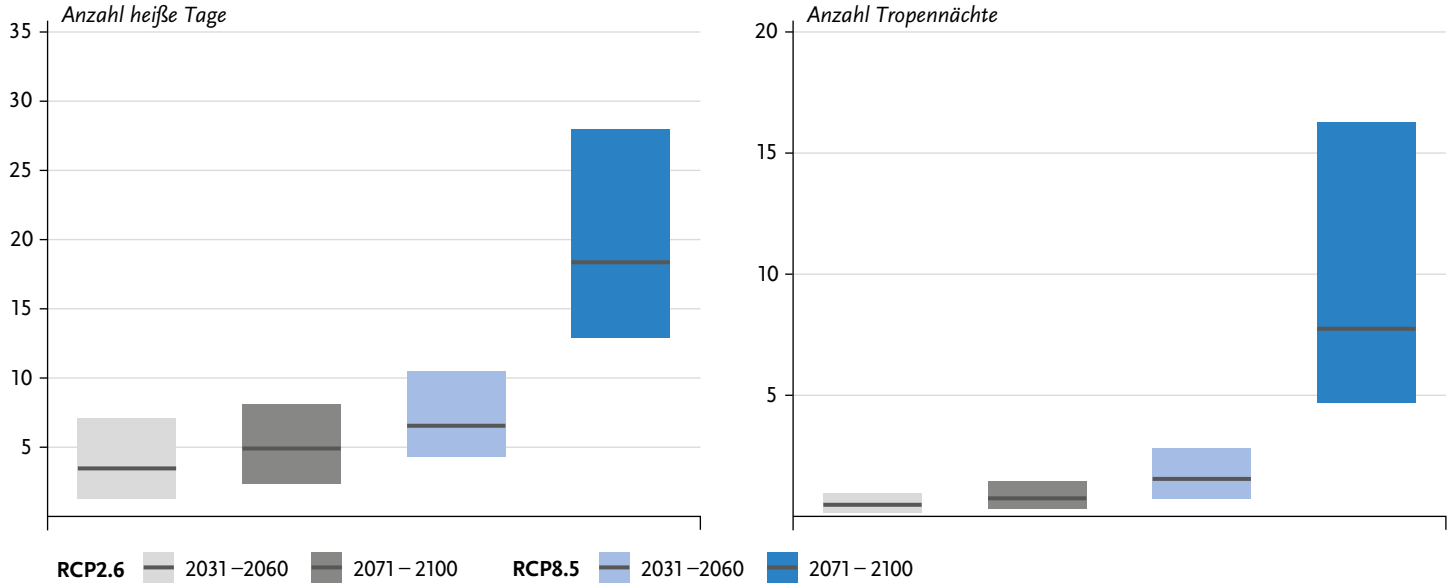


Abbildung 2
Projizierte Klimaänderung der heißen Tage und Tropennächte (Deutschlandmittel; in Tagen) im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971–2000) für die nahe und die ferne Zukunft unter Verwendung der Szenarien RCP2.6 und RCP8.5. Dargestellt sind der Ensemblemedian sowie die Bandbreite der Änderungssignale.
Quelle: Brienen et al. [11]

Tropennächte, d. h. Nächte, in welchen die Lufttemperatur nicht unter 20 °C fällt, sind in Deutschland bislang vergleichsweise selten. Lediglich an einzelnen, überdurchschnittlich warmen Stationen werden im Mittel zwei bis drei jährliche Tropennächte registriert. In Jahren mit sehr heißen Sommern wie 2003 wurden an einigen Stationen allerdings über zehn Tropennächte beobachtet. So gab es 2003 in Kehl bei Straßburg 21 Tropennächte. Infolge des voranschreitenden Klimawandels werden Tropennächte in Deutschland jedoch häufiger auftreten. Im Deutschlandmittel könnten bis zum Ende des Jahrhunderts bis zu 16 zusätzliche Tropennächte pro Jahr zu verzeichnen sein (Abbildung 2), in besonders warmen Regionen sogar bis zu 30 zusätzliche Nächte.

Auch Hitzewellen werden infolge des Klimawandels weiter zunehmen, sowohl hinsichtlich der Dauer, der Häufigkeit als auch der Intensität [12]. Bei einer Definition von Hitzewellen als Perioden von mindestens drei Tagen, an denen der Tagesmittelwert der Lufttemperatur über dem 95. Perzentil einer Referenzperiode liegt, konnten Schlegel et al. [12] eine Zunahme der Hitzewellentage auf 22 bis 23 Tage pro Jahr für den Zeitraum 2021–2050 (jeweils RCP4.5 und RCP8.5) gegenüber 13 Tagen im Referenzzeitraum (1981–2010) berechnen (Abbildung 3). Für die ferne Zukunft (hier definiert als die Periode 2068–2097) ergeben sich größere Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien. Im RCP4.5 steigen die Hitzewellentage auf 31 Tage pro Jahr an, im RCP8.5 erfolgt eine Zunahme auf 54 Tage pro Jahr. Gegenüber der Referenzperiode bedeutet dies eine mehr als Vervierfachung der Hitzewellentage.

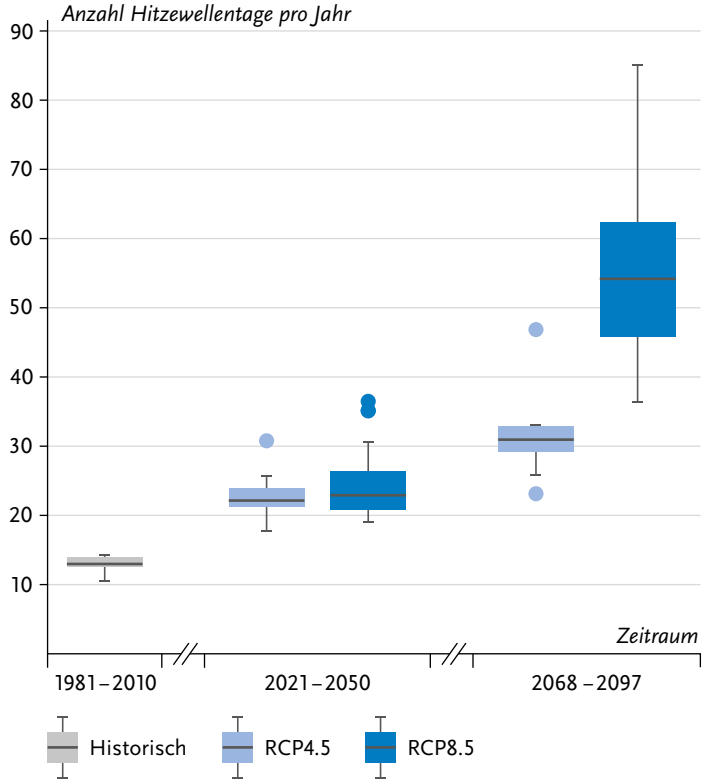


Abbildung 3
Mittlere Anzahl der Hitzewellentage im Referenzzeitraum 1981 – 2010 (links) und in den beiden Emissionsszenarien RCP4.5 (moderates Szenario) und RCP8.5 (weiter-wie-bisher-Szenario), jeweils für die nahe und ferne Zukunft.
Die Boxplots zeigen den Interquartilsbereich (IQR) als Box, die Ausdehnung der Daten als Whiskers (Linien mit maximal 1.5*IQR) und Ausreißer als Punkte außerhalb der Whiskers.
Quelle: Schlegel et al. [12]

1.3 Hitzebedingte Mortalität

Die gesundheitsgefährdenden Auswirkungen hoher Temperaturen zeigen sich besonders drastisch in der Mortalitätsstatistik. In heißen Wochen kann regelmäßig ein deutlicher Anstieg der Gesamtmortalität beobachtet werden (Abbildung 4). Allerdings wird nur für einen sehr kleinen Teil der während Hitzeperioden aufgetretenen Sterbefälle Hitze als Todesursache identifiziert (z. B. zwischen 7 und 60 Todesfälle in der Todesursachengruppe T67 „Schäden durch Hitze und Sonnenlicht“ in den letzten 20 Jahren [13]). Daher müssen statistische Verfahren herangezogen werden, um den Zusammenhang zwischen Hitze und Mortalität zu quantifizieren.

Methoden zur Schätzung der hitzebedingten Mortalität

Es gibt verschiedene Ansätze zur Quantifizierung der hitzebedingten Mortalität. Zunächst gibt es Verfahren, die den erwarteten Verlauf der Mortalität ohne Hitze (Hintergrundmortalität) abschätzen: Dazu kann die durchschnitt-

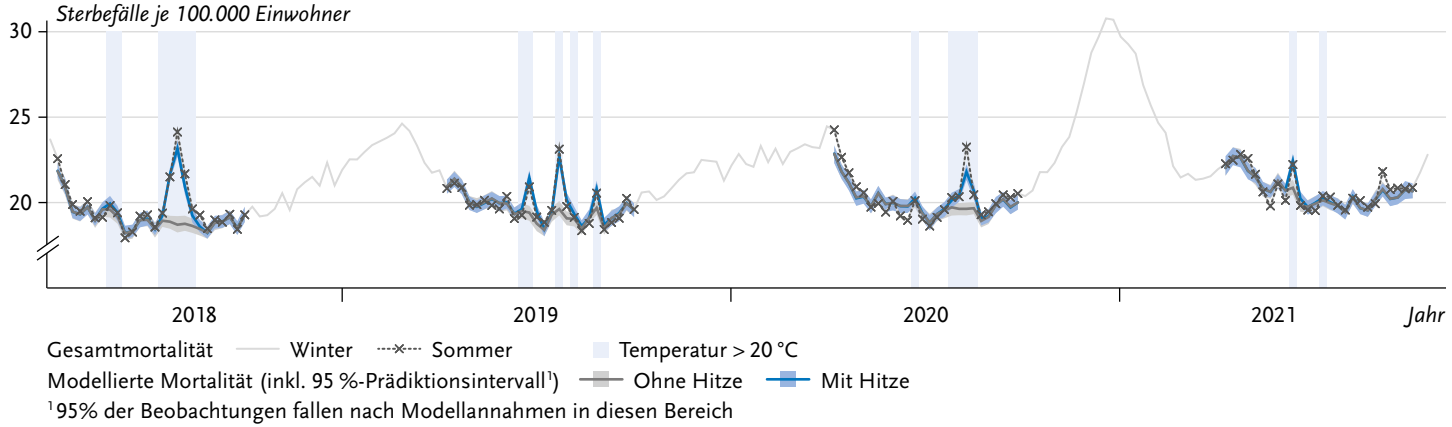


Abbildung 4
Beispiel der Modellierung hitzebedingter Sterbefälle. Die leicht erhöhte Gesamtmortalität im Frühjahr 2020 sowie die stark erhöhte Gesamtmortalität im Winter 2020/2021 sind auf die erste und zweite Welle der COVID-19-Pandemie zurückzuführen.
Quelle: Adaptiert nach Winklmayr et al. [14]

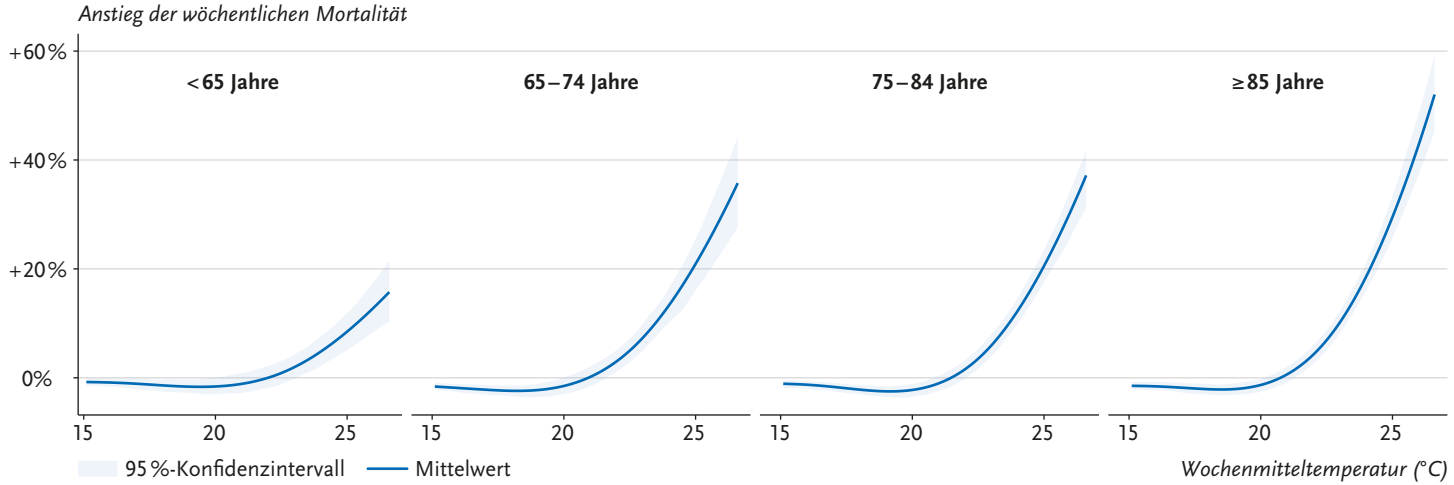


Abbildung 5
Expositions-Wirkungskurven zeigen den Anstieg der wöchentlichen Mortalität abhängig von der Wochenmitteltemperatur für vier Altersgruppen (Beispiel für Großregion in Deutschland im Zeitraum 2012 bis 2021)
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Modellierung in Winklmayr et al. [14]

liche Mortalität der Vorjahre verwendet werden [15, 16] oder der saisonale Verlauf der Mortalität kann mit einer periodischen Funktion, wie zum Beispiel einer Sinuskurve mit jährlicher Periode, nachgebildet werden [17, 18]. Beide Verfahren benötigen eine Zeitreihe der Mortalität über mehrere Jahre und müssen sicherstellen, dass in den Vorjahren aufgetretene Übersterblichkeiten die erwartete Anzahl von Todesfällen nicht verzerren. Die Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle ergibt sich dann als Differenz zwischen der (während einer Hitzeperiode) beobachteten Mortalität und der erwarteten Hintergrundmortalität.

Ein weiterer, ebenfalls häufig verwendeter Ansatz besteht darin, den Einfluss der Außentemperatur auf die Gesamtmortalität mittels sogenannter Expositions-Wirkungskurven zu beschreiben [19, 20] (Abbildung 5). Mithilfe solcher Kurven können prozentuale Veränderungen der Mortalität als Funktion der Temperatur quantifiziert und der systematische Zusammenhang zwischen hohen Außentemperaturen und einer erhöhten Mortalitätsrate untersucht werden. Insbesondere können auch Unterschiede zwischen geografischen Regionen oder demografischen Gruppen dargestellt werden oder Veränderungen der Expositions-Wirkungskurven über die Zeit analysiert werden, die Hinweise auf erfolgreiche Anpassung geben können. Beispielsweise zeigen die in Abbildung 5 dargestellten Expositions-Wirkungskurven, dass im Mittel Personen ab einem Alter von 85 Jahren bei gleicher Wochenmitteltemperatur eine deutlich stärkere Erhöhung der Mortalitätsrate erfahren als Personen, die jünger als 65 Jahre sind.

Hitzebedingte Mortalität in Deutschland

Eine bundesweite Schätzung der hitzebedingten Mortalität in Deutschland wurde erstmals 2019 berichtet [21]. In den darauffolgenden Jahren wurde die Methodik weiterentwickelt und die Schätzungen konnten bis in das Jahr 2022 ausgedehnt werden [14, 22]. Zusätzlich berichten auch einzelne Bundesländer regelmäßig eigenständige Schätzungen [15, 23].

In Hitzeperioden wird, insbesondere in den höheren Altersgruppen, regelmäßig ein deutlicher Anstieg der Mortalität beobachtet.

In den Jahren 2018 bis 2020 wurden erstmalig in drei aufeinanderfolgenden Jahren signifikante Anzahlen hitzebedingter Sterbefälle geschätzt. Insgesamt beläuft sich die Schätzung im Jahr 2018 auf etwa 8.300 hitzebedingte Sterbefälle. Im Jahr 2019 waren es rund 6.900 Sterbefälle und etwa 3.600 im Jahr 2020. Im Jahr 2021 war die Zahl der hitzebedingten Sterbefälle in Deutschland nicht statistisch signifikant. Im Jahr 2022 wurden dann rund 4.500 hitzebedingte Sterbefälle geschätzt [22]. Zwar ist die zunehmende Frequenz von Jahren mit signifikanten Anzahlen hitzebedingter Sterbefälle auffällig, dennoch ist hitzebedingte Mortalität kein völlig neues Phänomen. Auch in den historischen Hitzesommern 1994 und 2003 wurden jeweils rund 10.000 hitzebedingte Sterbefälle geschätzt [14].

Die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle in der Bevölkerung hängt von einer Kombination verschiedener Faktoren ab: von der Intensität und Dauer von Hitzeperioden (Hitzeexposition), der Größe besonders vulnerabler Bevölkerungsgruppen, aber auch davon, wie erfolgreich Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden konnten. Der größte Anteil hitzebedingter Sterbefälle (75 %) entfällt auf die Altersgruppe ab 75 Jahren. Im Zuge des demografischen Wandels ist bereits in naher Zukunft mit einem starken Wachstum der ältesten Bevölkerungsgruppen zu rechnen [24], wodurch sich auch die Zahl der potenziell von hitzebedingter Mortalität Betroffenen vergrößert.

Aufgrund der höheren Lebenserwartung von Frauen machen diese rund 60 % der Altersgruppe ab 75 Jahren aus und sind damit zahlenmäßig stärker von hitzebedingter Mortalität betroffen [23]. Pro 100.000 Einwohner derselben Altersgruppe treten bei Frauen und Männern hitzebedingte Sterbefälle in vergleichbarem Ausmaß auf. Allerdings scheinen sich auch die Risikofaktoren bei Frauen und Männern zu unterscheiden [25].

Die Intensität einer Hitzeperiode hängt nicht nur von der Lufttemperatur ab, sondern kann durch andere meteorologische Parameter verstärkt werden. So konnten Muthers et al. [26] zeigen, dass die Mortalität während der Hitzewelle 2015 in Baden-Württemberg deutlich stärker zunahm als während der Hitzewelle 2003 und dass dieser Unterschied durch die deutlich höhere Luftfeuchte während der Hitzewelle 2015 erklärt werden kann. Darüber hinaus können auch regionale Unterschiede etwa hinsichtlich der Bebauungsstruktur, der Gesundheitsversorgung oder der Alterszusammensetzung der Bevölkerung bei vergleichbarer Hitzeexposition zu Unterschieden in der Anzahl hitzebedingter Sterbefälle führen.

Des Weiteren bilden sich in Städten urbane Wärmeinseln aus. In städtischen Gebieten sind bodennah im Durchschnitt höhere Lufttemperaturen zu beobachten als in ländlichen Gebieten. Der Wärmeinseleffekt ist vor allem in den Sommermonaten von Bedeutung und tritt nachts stärker in Erscheinung. Die Intensität der Wärmeinsel in einer Stadt hängt unter anderem von der Größe der Stadt bzw. des Ballungsraumes und der Bebauungsdichte ab. An klaren Sommerabenden wurden maximale Unterschiede von 10 °C und mehr zwischen Stadtzentren und ländlichen Gebieten festgestellt [27].

In der Region Berlin-Brandenburg wurde im Zeitraum 1994 bis 2006 ein Zusammenhang zwischen der Übersterblichkeit während Hitzewellen und der Bebauungsdichte bzw. dem Anteil versiegelter Flächen gefunden [28]. Mit erhöhter Versiegelung ging eine erhöhte Mortalität einher, wobei im Stadtzentrum die höchsten Mortalitätsraten ge-

Hohe Temperaturen und Hitzewellen können hitzebedingte Erkrankungen auslösen, bereits bestehende Vorerkrankungen verschlimmern und bis zum Tod führen.

funden wurden. Insgesamt betrachtet ist hitzebedingte Mortalität aber sowohl in städtischen als auch in ländlich geprägten Räumen ein bedeutendes Problem.

Hitzebedingte Mortalität im europäischen Ausland

In den letzten Jahrzehnten (1979–2016) wurde eine Zunahme des Hitzestresses im Sommer um bis zu 1 °C beobachtet [29]. Hitzestress wurde in der Untersuchung mithilfe des Universellen Thermischen Klimaindex (universal thermal climate index, UTCI) bestimmt, der mittels einer Äquivalenttemperatur eine Aussage über das durchschnittliche subjektive thermische Empfinden des Menschen liefert. Dabei werden für den menschlichen Wärmehaushalt relevante meteorologische Größen wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungstemperatur miteinbezogen. Die Korrelation mit Mortalitätsdaten aus 17 europäischen Staaten ergab, dass die Beziehung zwischen dem UTCI und der Zahl der Sterbefälle vom thermischen Bioklima des jeweiligen Staates abhängt und die Sterbefallzahl bei mäßigem (26–32 °C UTCI) und starkem Hitzestress (>32 °C UTCI) zunimmt. Dabei zeigen sich unterschiedliche Mortalitätsverläufe in Abhängigkeit der thermischen Belastung. Es gibt Staaten, welche eine Zunahme der Mortalität sowohl bei hohem als auch bei niedrigem UTCI aufweisen, Staaten, bei denen nur unter Hitzeeinfluss eine Zunahme der Mortalität zu beobachten ist, sowie Staaten ohne sichtbaren Einfluss des UTCI [29].

1.4 Hitzebedingte Morbidität

Der menschliche Körper reagiert mit zwei maßgeblichen physiologischen Schutzmechanismen auf Hitzestress: (a) einer Umverteilung des Blutstroms zur Haut hin (Vasodilatation), um Wärme aus den Muskeln an die Umgebung abzuführen und (b) der Absonderung von Schweiß, der den Körper über Verdunstung kühlt [30]. Diese Mechanismen wiederum haben Auswirkungen auf andere Organe des Körpers: Die Vasodilatation benötigt mehr Leistung des Herzens mit reduziertem Füllungsdruck. Es muss in der Folge stärker und schneller schlagen, was eine höhere Sauerstoffversorgung voraussetzt. Bei Menschen mit Vorerkrankungen am Herzen kann das zu einem Ungleichgewicht zwischen Sauerstoffversorgung und -bedarf führen, was zu einer Durchblutungsstörung (Ischämie), Infarkt oder Kreislaufkollaps führen kann.

Hohe Temperaturen und Hitzeperioden können als direkte Effekte Hitzeerkrankungen auslösen (hitzebedingte Erkrankungen) oder bereits bestehende Vorerkrankungen verschlimmern (hitzesensitive Erkrankungen) und zum Tod führen (Abbildung 6). Zu den milden und moderaten Hitzeerkrankungen zählen Hitzeausschlag, Hitzeödem, hitzebedingte Bewusstlosigkeit (Hitzesynkope), Hitzekrämpfe und Hitzeerschöpfung, während ein Hitzschlag eine lebensbedrohliche Folge von Hitze darstellt [31, 32]. An heißen Tagen und während Hitzeperioden steigt das Unfallrisiko, z. B. bei handwerklichen Berufen oder in der Freizeit (Ertrinken beim Baden). Zudem kommt es nach Auswertungen der Gesetzlichen Krankenversicherung während Hitzeperioden nachweislich zu einer Abnahme der Leistungsfähigkeit und einem Anstieg hitzebedingter Arbeitsunfähigkeitstage [33].

Das Gesundheitssystem ist durch Krankenhauseinweisungen und hitzebedingte Notfälle zusätzlich belastet [30]. Gleichzeitig können die Strukturen des Gesundheits-

Abbildung 6
Direkte und indirekte Effekte von Hitze auf die Gesundheit
Quelle: Adaptiert nach World Health Organization [35]



systems durch Unterbrechungen ihrer Versorgung beeinträchtigt werden (z. B. Stromausfälle). Auch das medizinische Personal ist am Arbeitsplatz einer besonderen Hitzebelastung ausgesetzt, nicht zuletzt durch Schutzkleidung wie während der COVID-19-Pandemie [34].

Herz-Kreislauf-Erkrankungen

In Deutschland, wie auch in vielen anderen westlichen Ländern, sind Herz-Kreislauf-Erkrankungen die häufigste Todesursache. Auf Basis von Daten im Zeitraum 1993 bis 2015 für deutsche Großstädte wurde geschätzt, dass knapp ein Prozent der jährlichen Todesfälle durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen auf Hitze zurückzuführen ist [36]. In einer Studie wurde berechnet, dass die Morbidität an Herz-Kreislauf-Erkrankungen während einer Hitzeperiode um 2,2 % pro 1 °C Lufttemperaturzunahme steigt [37].

Daten des Augsburger Herzinfarktregisters zeigen, dass starke Temperaturausschläge das Risiko für einen Herzinfarkt erhöhen können [38]. In anderen Studien von Sun et al. [39] konnte dargelegt werden, dass an Tagen mit steigender Temperatur und den darauffolgenden Tagen eine erhöhte Anzahl an Krankenhausaufnahmen mit der Diagnose Herzinfarkt zu verzeichnen war. Hitze ist außerdem verbunden mit einer erhöhten Rate an Todesfällen durch Herzinsuffizienz und Schlaganfälle. Stark gefährdet sind insbesondere hochaltrige Personen und Personen mit bestehenden Vorerkrankungen (insbesondere Herz-Kreislauf-Erkrankungen).

Atemwegserkrankungen

Hitzebedingte Lungenprobleme (z. B. Lungenödem, akutes Atemnotsyndrom, erhöhter pulmonaler Stress durch hitzebedingte Hyperventilation und erhöhte Luftverschmut-

zung bei hohen Außentemperaturen) stellen nach Herz-Kreislauf-Erkrankungen die zweithäufigste Ursache für Mortalität und Morbidität während Hitzeperioden dar [30]. Verkehrsbedingte Luftverschmutzung vor allem in Großstädten hat einen zur Hitze zusätzlichen indirekten Effekt auf das Morbiditäts- und Mortalitätsrisiko für Patientinnen und Patienten mit chronischen Atemwegserkrankungen [40] (siehe auch Beitrag in diesem Sachstandsbericht zu Luftschadstoffen von Breitner-Busch et al. [41]). In den Sommermonaten kommt es an heißen Tagen in Großstädten häufiger zu teils lebensbedrohlichen Verschlechterungen (Exazerbationen) im Krankheitsverlauf von Patientinnen und Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (chronic obstructive pulmonary disease, COPD). Bei Hitze gibt der Körper nicht nur über die Haut, sondern auch über die Lunge Wärme ab, wobei sich die Atemfrequenz leicht erhöht. Dieser Wärmetransport ist bei Lungenvorgeschädigten allerdings eingeschränkt, sodass ein effizientes Abatmen der Wärme nur begrenzt funktioniert. Darüber hinaus führt die erforderliche Muskelarbeit für die vermehrten Atembewegungen auch selbst zu einer Steigerung der Körpertemperatur. Schließlich wird durch eine dehydrierungsbedingte Minderdurchblutung der Lunge eine größere Infektanfälligkeit bewirkt [42].

Metabolische Erkrankungen

Auch Personen mit Diabetes tragen ein erhöhtes Risiko, während einer Hitzeperiode ins Krankenhaus eingeliefert zu werden. Ähnlich wie bei Lungenerkrankten besteht bei diesen Patientinnen und Patienten in der Lunge eingeschränkte thermoregulatorische Reaktionsfähigkeit auf vaskulärer Ebene, da Hitzeeinwirkung die Selbstregulation der Blutgefäße beeinflusst, was zu einer verstärkten Neigung zu Gerinnselbildung führt [43].

Nierenerkrankungen

Reduziertes Blutvolumen durch Dehydrierung kann zu einer Schädigung der Nieren führen. Wie vor allem in heißen Regionen der Erde bei Menschen, die draußen arbeiten, beobachtet wurde, kann chronische Dehydrierung eine Nierenfibrose (Vernarbung der Niere) und chronische Nierenerkrankung verursachen [30].

Auswirkungen auf Schwangere

Es liegt vermehrt Evidenz vor, dass hohe Temperaturen sich auf Schwangere und den Verlauf der Schwangerschaft auswirken können, z. B. durch eine reduzierte Blutversorgung über die Plazenta, Dehydrierung oder entzündliche Prozesse, die Frühgeburten auslösen können [44, 45]. Eine Metaanalyse berechnet zum Beispiel, dass die Wahrscheinlichkeit einer Frühgeburt pro 10 °C Temperaturanstieg 1,05 (95 %-Konfidenzintervall (KI): 1,03–1,07) mal höher liegt und 1,16 (95 %-KI: 1,10–1,23) mal höher während Hitzewellen (definiert als zwei oder mehr Tage, deren Temperatur über dem 90. Perzentil liegt). Hitzeexposition der Schwangeren über den Verlauf der Schwangerschaft kann zudem zu geringem Geburtsgewicht (< 2.500 Gramm) des Neugeborenen führen [46].

Wechselwirkungen mit Arzneimitteln

Neben den oben erwähnten Einflussfaktoren spielt auch die Einnahme von Medikamenten eine wesentliche Rolle in den Auswirkungen von Hitze auf den individuellen Menschen [47, 48]. Tabelle 1 listet eine Reihe von Arzneimitteln

Verschiedene Arzneimittelgruppen, insbesondere blutdrucksenkende oder entwässernde Präparate, können bei Hitze gefährliche Nebenwirkungen entfalten.

und Wirkstoffgruppen, die bei Hitze gefährliche Nebenwirkungen entfalten können. Insbesondere ergänzt Tabelle 1 die Tabelle in [48].

Hitzebedingte Vasodilatation kann den blutdrucksenkenden Effekt vieler Herz-Kreislauf-Mittel deutlich verstärken mit der Folge von Synkopen mit möglicherweise schwerer Verletzungsfolge (beispielsweise durch Stürze) oder kritischen Organischämien (Organdurchblutungsstörungen) bis hin zum Herzinfarkt. Besonders gefährdet sind hier Personen mit systolisch bedingter Herzinsuffizienz (Herzschwäche), sowie Patientinnen und Patienten mit Bluthochdruck. Blutdrucksenkende Medikamente (Antihypertensiva), die häufig auch als Mittel gegen Herzinsuffizienz verschrieben werden, können bei Hitze zu einer zu starken Blutdrucksenkung führen. Besonders problematisch ist die Kombination mit Medikamenten zur Entwässerung (Diuretika). Diese werden (allein oder in Kombination mit anderen Antihypertensiva) zur Blutdrucksenkung, aber auch zur Entwässerung bei Personen mit Herzinsuffizienz eingesetzt [48].

Auch Arzneimittel, welche die Wirkung des Neurotransmitters Acetylcholin hemmen (Anticholinergika), können bei Hitze zu Komplikationen führen, da sie die zentrale Temperaturregulierung beeinflussen und das Schwitzen unterbinden. Diese anticholinerge Wirkung ist in vielen Arzneimitteln enthalten, die für ein breites Spektrum von Beschwerden (Asthma bronchiale bis Harninkontinenz) eingesetzt werden [49].

Weitere große Arzneimittelgruppen, die bei Hitze unerwünschte Wirkungen entwickeln können, sind Wirkstoffe, die zur Behandlung von Herzrhythmusstörungen eingesetzt werden (Antiarrhythmika), Wirkstoffe zur Behandlung der koronaren Herzkrankheit (Antianginosa) sowie Antidiabetika. Auch verschiedene Schmerzmittel tragen ein hohes Interaktionspotenzial, besonders aber Opiate, die zur Aufnahme über die Haut verabreicht werden [50].

Auch bei jüngeren, weniger häufig vorerkrankten Personen zeigen bestimmte Arzneimittel bei Hitzeexposition potenziell gefährliche Nebenwirkungen. So konnte kürzlich in der Analyse des Augsburger MONICA/KORA-Herzinfarktregisters gezeigt werden, dass Patientinnen und Patienten, die Plättchenhemmer oder Betablocker einnehmen, vulnerabler für nicht-tödliche Herzinfarkte infolge von Hitzeexposition sind als Personen ohne diese Medikamente [51].

Die vergleichsweise neue Wirkstoffgruppe der SGLT2-Inhibitoren, welche bei der Behandlung von Diabetes eingesetzt werden, kann bei Hitze ebenfalls zu unerwünschten Effekten führen. Hier kommt es zu einer vermehrten Glukose- und damit Volumenausscheidung über den Harn. Diese Medikamentengruppe ist insofern wichtig zu beachten, da sie aufgrund ihrer deutlichen Indikationserweiterung (neben Diabetes nun auch bei allen Formen der Herzinsuffizienz und bald auch bei Niereninsuffizienz) leitliniengerecht bei sehr vielen Patientinnen und Patienten eingesetzt werden wird [52, 53].

Darüber hinaus muss zum einen berücksichtigt werden, dass die Lagerfähigkeit von Arzneimitteln im Allgemeinen durch Hitze beeinträchtigt wird, wodurch die Wirksamkeit verringert werden kann [54]. Zum anderen haben viele Medikamente ein umfassendes Interaktionspotenzial, welches durch die Einwirkungen von Hitze massiv gesteigert werden kann.

Tabelle 1
Medikamenteninteraktion/Nebenwirkungspotenzial in Hitzeperioden, unterteilt nach Wirkstoff/Indikationsklassen
Quelle: Adaptiert und erweitert nach Kuch [48]

Wirkstoff/Indikationsklasse	Beispiele	Art der durch Hitze aggravierten Nebenwirkung
Anticholinerge Arzneimittel (dazu zählen viele Psychopharmaka, Antidepressiva, aber auch Bronchoinhalativa etc.)	Viele Benzodiazepine (Schlafmittel), Atosil (Antipsychotikum), trizyklische Antidepressiva, Ipra-/Tiotropiumbromid (COPD), Trospiumchlorid, (gegen Dranginkontinenz), Biperiden, Oxybutinin (Antiparkinsonmittel), Butylscopalamin (Magen-Darm-Krämpfe), Scopalamin (gegen Übelkeit, z. B. bei Reisekrankheit), Dimenhydrinat (gegen Übelkeit, Beruhigung), Antihistaminika (gegen Allergien)	Hemmung der zentralen Temperaturregulierung → Schwitzen verringert, Kognitionseinschränkung; Blutdruckabfälle und andererseits Blutdruckkrisen
Antihypertensiva (AHT, Bluthochdruckmittel)	Betablocker, ACE-Inhibitoren, Sartane, Kalziumantagonisten, Clonidin, Moxonidin (letztere zentral wirksam)	Einerseits Verhinderung der Erweiterung der Blutgefäße (Betablocker) in der Haut → Hitzeableitung durch Konvektion verringert, Erhöhung der Schweißsekretionsschwelle (zentrale AHT); andererseits Verstärkung der blutdrucksenkenden Wirkung durch Vasodilatation → Blutdruckabfälle
Diuretika (als Bluthochdruckmittel oder bei Herzinsuffizienz)	Hydrochlorothiazid, in vielen Kombinationspräparaten enthalten, Chlortalidon, Indapamid, Torasemid, Furosemid, Spironolacton	Verstärkung der Blutdrucksenkung, Austrocknung, Nierenversagen, gefährliche Elektrolytentgleisung
Antianginosa (bei koronarer Herzerkrankung)	Nitrate wie ISMN, ISDN, Molsidomin	Besondere gefäßerweiternde Wirkung → gefährliche Blutdruckabfälle
Antiepileptika	Carbamazepin, Valproinsäure, Lamotrigin, Benzodiazepine, Barbiturate	Beeinträchtigung der kognitiven Wachsamkeit, Verstärkung von Elektrolytentgleisungen (Hyponatriämie) [55, 56]
Schmerzmittel	NSAR (Ibuprofen, Diclofenac, Coxibe), Opiate/Opioide (Fentanylpflaster, orale Medikamente wie Morphin, Hydromorphon, Codein, Dihydrocodein, Pethidin, Tilidin, Tramadol)	Gefahr des Nierenversagens, Auslösung von Bluthochdruckentgleisungen, Verschlechterung von Herzinsuffizienz bei Exsikkose, bei Opiaten/Opioiden Gefahr der Akkumulation bzw. verstärkter Wirkstofffreisetzung bei transdermalen Systemen → kognitive Beeinträchtigung, Atemdepression, anticholinerge Nebenwirkungen
Insuline	Basalinsuline, schnellwirksame Insuline etc.	Unter Hitzebedingungen gegebenenfalls rascheres Anfluten mit Gefahr der Hypoglykämie (Unterzuckerung)
SGLT2-Inhibitoren (bei Diabetes, Herzinsuffizienz und Niereninsuffizienz)	Dapagliflozin, Empagliflozin, Ertugliflozin	Gefahr der Exsikkose, Erhöhung der Gefahr atypischer Ketoazidose unter Volumenmangel

ACE = Angiotensin Converting Enzyme, AHT = Antihypertensiva, COPD = chronisch obstruktive Lungenerkrankung, ISDN = Isosorbiddinitrat, ISMN = Isosorbidmononitrat, NSAR = nicht-steroidale Antirheumatika, SGLT2-Inhibitoren = Natrium-Glukose-Cotransporter 2-Inhibitoren

1.5 Vulnerable Bevölkerungsgruppen

Zu den Bevölkerungsgruppen, die aufgrund ihrer Risikofaktoren vulnerabel für hitzebedingte Morbidität und Mortalität sind, zählen ältere Menschen (insbesondere Alleinlebende), Vorerkrankte (hier vor allem Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Atemwegserkrankungen, Nierenerkrankungen, Übergewicht, Diabetes), Schwangere, Säuglinge und Kleinkinder, Menschen, die im Freien schwer arbeiten oder intensiv Sport treiben, Menschen mit körperlichen und geistigen Beeinträchtigungen, sozial schlechtergestellte Personen und Obdachlose [31]. Das Thema gesundheitliche Chancengleichheit im Klimawandel wird auch in einem Artikel dieses Sachstandsberichts von Bolte et al. [57] behandelt.

Um hitzebedingte Krankheits- und Sterbefälle so weit wie möglich zu vermeiden, sollten Hitzeaktionspläne (HAP, auf die im Abschnitt 2.2 Hitzeaktionspläne zum Schutz der Gesundheit ausführlich eingegangen wird) und andere Maßnahmen vor allem jene Personen in den Blick nehmen, die ein erhöhtes gesundheitliches Risiko während Hitzeperioden tragen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die betroffenen Bevölkerungsgruppen.

2. Anpassungsmaßnahmen zum Schutz der Gesundheit bei Hitze

2.1 Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes

Um Anpassungsmaßnahmen an Hitzeperioden zu ermöglichen, ist es im ersten Schritt notwendig, bevorstehende Hitzeperioden zu erkennen und die Bevölkerung sowie das Gesundheitssystem über diese rechtzeitig zu informieren. Diese Aufgabe übernimmt in Deutschland das Hitzewarnsystem des DWD [59], das im Sommer 2005 bundesweit in Betrieb genommen wurde. Ausschlaggebend für die Entwicklung waren die Erfahrungen des Sommers 2003, der europaweit zu zahlreichen zusätzlichen Todesfällen geführt hatte (z. B. [60]).

Eine physiologisch relevante Bewertung von Hitzeperioden muss neben der Lufttemperatur auch den Wasserdampfgehalt der Luft (Schwüle), sowie die Wind- und Strahlungsverhältnisse berücksichtigen. Beim Hitzewarnsystem des DWD erfolgt dies über die „Gefühlte Temperatur“ [6]. Die Gefühlte Temperatur beschreibt das Temperaturempfinden eines „Standard-Menschen“ (Klima-Michel) und übersetzt dazu die aktuellen thermischen Bedingungen in die Lufttemperatur einer Standardumgebung. Für die Gefühlte Temperatur existieren Belastungsklassen, die eine thermisch relevante Bewertung der aktuellen Bedingungen ermöglichen [6].

Hitzewarnungen werden vom DWD auf Landkreisebene jeweils für den aktuellen und den folgenden Tag herausgegeben. Bei den Warnungen wird dabei die Höhenlage im Landkreis berücksichtigt, sodass eine Warnung auch nur für Teile des Landkreises (z. B. Gebiete unterhalb von 800 m Höhe) gültig sein kann. Bei den Hitzewarnungen werden zwei Warnstufen unterschieden: Eine „Warnung vor starker Wärmebelastung“ wird veröffentlicht, wenn die Gefühlte Temperatur, die Schwelle von 32 °C ± 2 °C überschreitet; eine „Warnung vor extremer Wärmebelastung“ hingegen, wenn erwartet wird, dass die Gefühlte Temperatur am frühen Nachmittag (14 Uhr) die Schwelle von 38 °C überschreitet. Die Schwelle für eine starke Wärmebelastung variiert im Laufe des Sommers in Abhängigkeit von der meteorologischen Vorgeschichte. Waren die vorausgehenden Wo-

Tabelle 2
Bevölkerungsgruppen, die bei Hitzeperioden ein größeres gesundheitliches Risiko tragen
Quelle: Aktualisiert und ergänzt nach World Health Organization [31]

Kategorie	Risikogruppe
Physiologische Anpassungskapazität	▸ Ältere Menschen (>65 Jahre) ▸ Säuglinge und Kleinkinder ▸ Schwangere
Vorerkrankungen	▸ Kardiovaskuläre Erkrankungen (z. B. arterielle Hypertonie, koronare Herzkrankheit, Herzinsuffizienz) ▸ Zerebrovaskuläre Erkrankungen (z. B. Schlaganfall) ▸ Respiratorische Erkrankungen (z. B. COPD, Asthma bronchiale) ▸ Stoffwechselerkrankungen (z. B. Diabetes mellitus) ▸ Neurologische Erkrankungen (z. B. Morbus Parkinson durch krankheitsbedingt beeinträchtigte Thermoregulation) ▸ Psychische Erkrankungen (z. B. Depression, Schizophrenie, Drogenabhängigkeit) ▸ Nierenerkrankungen (z. B. Niereninsuffizienz) ▸ Übergewicht ▸ Einnahme von bestimmten Medikamenten zur Behandlung der genannten Erkrankungen (siehe Tabelle 1)
Menschen mit Behinderung	▸ Körperliche Behinderungen (z. B. Rückenmarksverletzungen [58]) ▸ Geistige Behinderungen, da sich Personen mit schweren kognitiven Einschränkungen schlechter selbst vor Hitze schützen können.
Funktionelle Einschränkungen	▸ Bettlägerigkeit ▸ Unterbringung in Pflegeeinrichtung
Sozioökonomische Faktoren	▸ Soziale Isolation, insbesondere im hohen Alter ▸ Obdachlosigkeit ▸ Ungünstige Wohnsituation
Körperliche Anstrengung bei hohen Außentemperaturen	▸ Im Freien Arbeitende (z. B. in der Landwirtschaft, im Bausektor) ▸ Im Freien Sporttreibende ▸ Gesundheitspersonal, v. a. in Kombination mit persönlicher Schutzausrüstung
Beschäftigte, die ihren Arbeitsplatz auch bei hohen Innenraumtemperaturen während Hitzewellen nicht verlassen können	▸ Mitarbeitende in Medizin- und Pflegeeinrichtungen, v. a. in Kombination mit persönlicher Schutzausrüstung

COPD = chronisch obstruktive Lungenerkrankung

chen kühler (wärmer), liegt die Schwelle etwas tiefer (höher) [18]. Dieser Ansatz ermöglicht es, die kurzfristige Anpassung an die Hitze, wie sie im Laufe eines jeden Sommers stattfindet, zu berücksichtigen.

Neben den Bedingungen am Tag wird bei den Warnungen vor starker Wärmebelastung auch die Nacht berücksichtigt. Da sich die meisten Menschen in der Nacht in Gebäuden aufhalten, wird dazu über ein Gebäudesimula-

tionsmodell die Innenraumtemperatur eines Standardgebäudes ermittelt [61]. Diese Temperatur muss über bestimmten, regional differenzierten Schwellenwerten liegen, damit eine Warnung vor starker Wärmebelastung herausgegeben werden kann. Die Warnungen werden ergänzt durch Zusatzmodule, die genauer auf die Belastung von alten und pflegebedürftigen Menschen eingehen und den Effekt der städtischen Wärmeinsel berücksichtigten.

In Deutschland werden aktuelle Hitzewarnungen über einen E-Mail-Newsletter, die DWD-Warnkarte oder via verschiedene Smartphone-Apps verteilt. Außerdem werden die Hitzewarnungen über die Warnsysteme des Katastrophenschutzes verbreitet. Der E-Mail-Newsletter beinhaltet auch situationsspezifische Verhaltensempfehlungen. Pflegeheime und andere Träger des Gesundheitssystems werden von Seiten der Landesgesundheitsämter angehalten, den DWD-Newsletter zu abonnieren.

Ist eine Hitzewarnung herausgegeben, sind die zuständigen Gesundheitsbehörden der Bundesländer aufgerufen Interventionsmaßnahmen einzuleiten. Ergänzend zur Hitzewarnung für die nächsten 48 Stunden stellt der DWD auch eine Hitzevorinformation für die nächsten zwei bis acht Tage bereit [62].

Hitzeaktionspläne dienen als Instrument zur Etablierung gezielter Interventionsmaßnahmen zum präventiven Gesundheitsschutz und der Gesundheitsförderung.

2.2 Hitzeaktionspläne zum Schutz der Gesundheit

Bis zu den Ereignissen des extremen Hitzesommers 2003 in Westeuropa mit seinen katastrophalen Gesundheitseffekten fehlte in den meisten europäischen Staaten eine geeignete Vorsorgeplanung zum Schutz der Bevölkerung vor gesundheitlichen Auswirkungen extremer Hitze. Auf der Basis erster Studienergebnisse, Erkenntnisse und Erfahrungen hat das Regionalbüro Europa der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) 2008 einen Leitfaden für Hitzeaktionspläne (HAP) zum Schutz der Gesundheit veröffentlicht [63]. HAP dienen als Instrument zur Etablierung gezielter Maßnahmen zum präventiven Gesundheitsschutz, und wurden seither in mehreren europäischen Staaten, wie zum Beispiel in Frankreich, Italien und der Schweiz, etabliert.

Das übergeordnete Ziel ist es, das Gesundheitsrisiko extremer Hitzeperioden zu reduzieren und die individuelle Widerstandsfähigkeit gegenüber ungünstigen Entwicklungen zu stärken. Um besser auf die (zum Teil bereits eingetretenen) durch den Klimawandel bedingten Umweltveränderungen vorbereitet zu sein, sind neben Klimaschutz auch zielgerichtete Anpassungsmaßnahmen notwendig. Deshalb hat eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe auf der Basis des WHO-Leitfadens [63] im Auftrag der Bundesministerien für Umwelt und Gesundheit im Jahr 2017 Handlungsempfehlungen für die Erarbeitung von HAP zum Schutz der menschlichen Gesundheit erstellt, mit deren Hilfe Bundesländer und Kommunen konkrete Maßnahmenpläne erarbeiten und in die Umsetzung bringen sollen [64]. Sie skizzieren kurz-, mittel- und langfristige Optionen für gesundheitliche Anpassungsmaßnahmen für eine zeitnahe und schrittweise Realisierung regional bzw. lokal angepasster HAP. Diese Empfehlungen basieren auf acht Kernelementen und setzen einen Rahmen für die Entwicklung von individuellen Sofortmaßnahmen, die während einer akuten Hitzeperiode primär präventiv umzusetzen sind, über Vorbereitungs-, Präventiv- und Behandlungsmaßnahmen in Einrichtungen der Gesundheitsversorgung und der Pflege unter be-

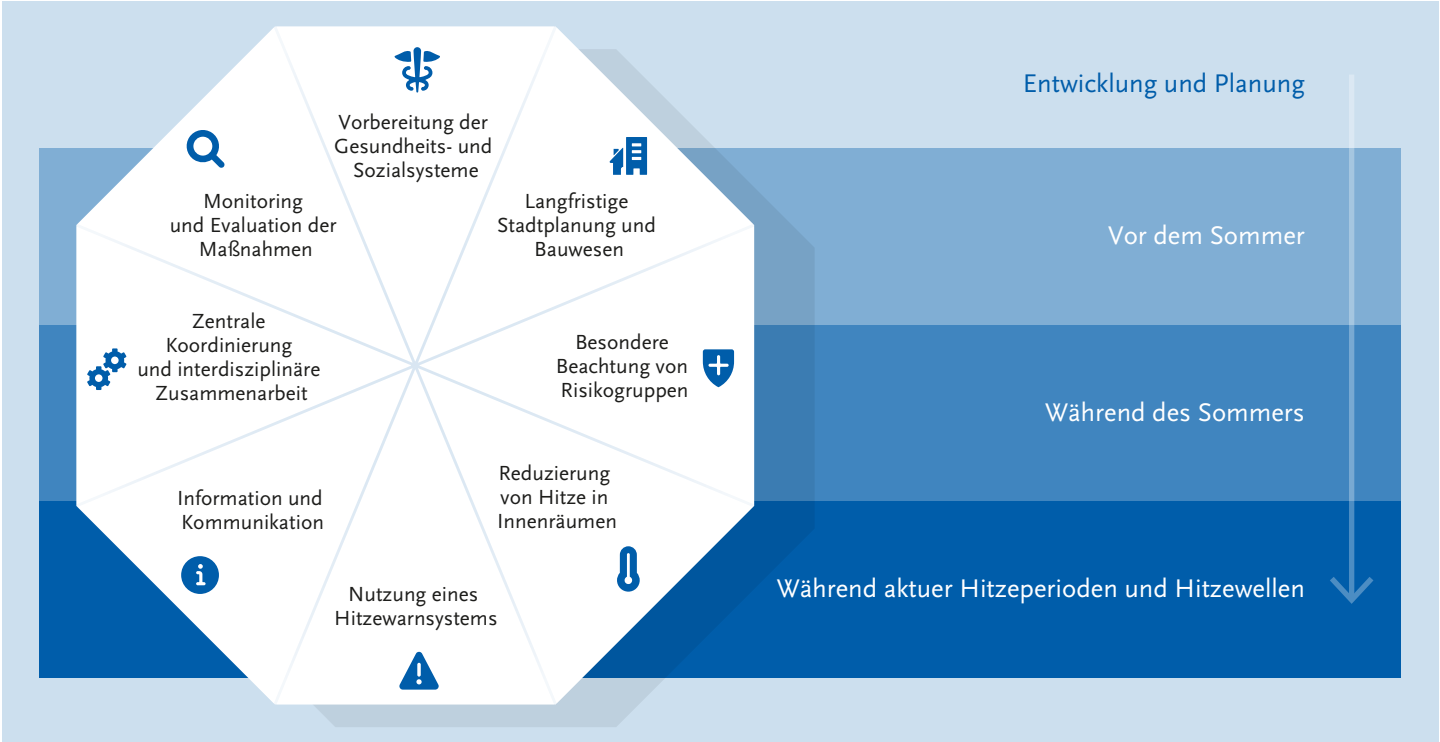


Abbildung 7
Die acht Kernelemente eines gesundheitsbezogenen Hitzeaktionsplans mit ihrer zeitlichen Umsetzung: Die meisten Kernelemente kommen in jeder Vorbereitungs- und Schutzphase zur Umsetzung
Quelle: Adaptiert nach World Health Organization [63] und Straff et al. [64]

sonderer Berücksichtigung vulnerabler Bevölkerungsgruppen bis zu Anpassungen der Bau- und Stadt- bzw. Raumplanung, die erst längerfristig Erfolg zeigen können (Abbildung 7).

Während die Bundesebene den Rahmen für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels vorgibt, wie mit der Regierungsstrategie „Deutsche Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ [65] und den HAP-Handlungsempfehlungen [64], liegt die Umsetzungszuständigkeit konkreter Anpassungsmaßnahmen überwiegend auf kommunaler Ebene [66]. Da extreme Hitzeereignisse und ihre Folgen jedoch nicht in gleicher Weise überall in Deutschland auftreten, müssen regional und lokal spezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden. Darum folgen Anpassungsmaßnahmen dem Subsidiaritätsprinzip, d. h. konkrete Maßnahmen sollen auf der am besten geeigneten Ebene kompetent und verantwortlich umgesetzt werden. Die Umsetzung von HAP auf kommunaler Ebene wird dringend empfohlen [34, 67], ist jedoch bislang rechtlich nicht vorgeschrieben. Die Anpassung an die Folgen des Klimawandels, so auch an Hitze, wird bundesseitig mit verschiedenen Förderprogrammen unterstützt, über die Finanzmittel zur Durchführung entsprechender Projekte insbesondere von Kommunen beantragt werden können.

Mehrere Studien haben in den letzten Jahren untersucht, ob und wie die HAP-Handlungsempfehlungen von Ländern und Kommunen aufgegriffen und welche Pläne und Anpassungsmaßnahmen zur Vermeidung von gesundheitlichen Hitzeschäden bereits umgesetzt wurden [68–71].

Die Ergebnisse einer bundesweiten, im Frühjahr 2020 durchgeführten Online-Erhebung zeigen, dass die Gesundheitsrelevanz von Hitze als Querschnittsthema auf den Ebenen des Bundes, der Länder und Kommunen präsent ist und sich sowohl die Umwelt- als auch Gesundheitsressorts hiermit befassen [70, 72]. In einigen Kommunen und jüngst auch auf Länderebene befinden sich HAP in der Umsetzung [15, 70, 73]. Besonders aktiv sind die Bundesländer und Kommunen in der Kommunikation von Informationen und Bildungsmaterialien. Damit tragen sie zur Eigenvorsorge gegenüber Hitzeextremen im Rahmen der Verhaltensprävention bei. Dabei handelt es sich oft um niedrigschwellige, leicht umzusetzende Anpassungsmaßnahmen im individuellen Bereich. Viele Städte listen beispielsweise auf ihren Webseiten oder in gedruckten Ratgebern Tipps zum richtigen Verhalten bei Hitze für ihre Bürgerinnen und Bürger auf. Insgesamt ist festzustellen, dass nach der Einführung, Verbreitung und Bewerbung der HAP-Handlungsempfehlungen [64] seit 2017 die Anzahl von hitzepräventiven Maßnahmen und Projekten in Deutschland stetig steigt [74] und dass in jüngerer Vergangenheit auf der Ebene der Kommunen und Bundesländer HAP erarbeitet werden (Abschnitt 2.4 Positivbeispiele für gesundheitsbezogenen Hitzeschutz). Unklar bleibt indes, ob damit die Kriterien für einen wirksamen kurz- und mittelfristigen Schutz erfüllt sind, da einzelne Projekte nur manche der acht Kernelemente der Handlungsempfehlungen umfassen [68].

2.3 Weitere Empfehlungen zur Hitzeprävention und zum Hitzeschutz

Die Evidenz für wirksamen Hitzeschutz ist bei Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern zum großen Teil bekannt. Eine breite Auswahl an Informationsmaterialien ist verfügbar, die Beispiele für konkrete Interventionen und Maßnahmenpläne im Gesundheits- und Pflegebereich werden mehr und das Angebot an Bildungsmodulen zum Thema nimmt seit einigen Jahren stetig zu, wie eine Arbeitshilfe zur Entwicklung und Implementierung eines HAP für Städte und Kommunen mit konkreten Umsetzungsbeispielen aus der kommunalen Praxis zeigt (Infobox 2) [75]. Unter Berücksichtigung der Anfang 2020 eingetretenen COVID-19-Pandemie wurden einige Informationsmaterialien und Empfehlungen für Maßnahmen im Gesundheitssektor an die Situation angepasst (z. B. [34, 76]).

Im Sommer 2021 wurden Schlüsselpersonen aus dem deutschen Gesundheitswesen in semi-strukturierten Interviews zur Umsetzung von integrierten HAP befragt, um die Empfehlungen des Lancet Countdown on Health and Climate Change Policy Briefs für Deutschland von 2019 zu überprüfen [67]. In Übereinstimmung mit bundesweiten Erhebungen [68, 70, 75] schätzten die befragten Expertinnen und Experten, dass bislang nur wenige Kommunen umfassende und integrierte HAP umgesetzt haben, in denen es gelungen ist, Akteure aus dem Gesundheitssektor, wie Ärzteschaft und Pflege, Rettungsdienste und Kliniken, in die Entwicklung der Pläne umfassend einzubinden. Es ist eine Voraussetzung, dass die zuständigen Behörden und Akteurinnen und Akteure im Gesundheitsbereich gesundheitsbezogenen Hitzeschutz als ihre Pflicht verstehen

Der Gesundheitssektor sollte bei der Entwicklung und Umsetzung von Hitzeaktionsplänen eine Schlüsselrolle einnehmen.

und sich daraus entsprechende Initiative und aktive Beteiligung entwickelt. Kaiser et al. [70] zeigen allerdings auch, dass allein die Existenz und Bekanntheit der Handlungsempfehlungen nicht ausreicht, damit Kommunen erfolgreich HAP erarbeiten können. So fehlt es einigen Kommunen etwa an Finanzmitteln und Personal, um HAP zu entwickeln und zu implementieren [70]. Auch wird auf das Fehlen einer rechtlichen Basis hingewiesen, die ein verbindliches Handeln mit eingeplanten Ressourcen ermöglicht. Im Juni 2022 entschied sich die Gesundheitsministerkonferenz für ein Umsetzungskonzept unter Einbindung unterschiedlicher Länder-Arbeitsgruppen des Gesundheitswesens zur Begleitung des Beschlusses aus 2020 [77]. Zwischenzeitlich haben erste Bundesländer, wie u. a. Hessen und Nordrhein-Westfalen, Erklärungen bzw. Beschlüsse für die Umsetzung von HAP gefasst. Der 125. Deutsche Ärztetag fasste im Herbst 2021 zudem unter dem Tagesordnungspunkt „Klimaschutz ist Gesundheitsschutz" mehrere Beschlüsse [78], letzthin um den hohen Anteil von zwischen 5–6,7 % der durch den Gesundheitssektor verursachten gesamtdeutschen Treibhausgasemissionen zu mindern und sich auf Klimaneutralität auszurichten [41, 79].

2.4 Positivbeispiele für gesundheitsbezogenen Hitzeschutz

Zum gesundheitsbezogenen Hitzeschutz gibt es in Deutschland eine Reihe von positiven Beispielen, die in der Praxis bereits umgesetzt sind. Sie reichen von der Entwicklung von Informationsmaterialien für vulnerable Bevölkerungsgruppen und Einrichtungen bis zu HAP und Aktionsbündnissen im Gesundheitssektor. Auch Fortbildungs- und

Infobox 2
Auswahl von Angeboten und Empfehlungen zur Hitzevorsorge für die Anwendung im Gesundheitssektor

Gesundheitsschäden durch Hitze und extreme Hitzeperioden lassen sich weitgehend vermeiden. Ihre Prävention erfordert eine Reihe von Maßnahmen unterschiedlicher Ebenen: von der Vorsorge des Gesundheitswesens, die mit meteorologischen Frühwarnsystemen abgestimmt ist, über rechtzeitige amtliche und ärztliche Hinweise bis zu Verbesserungen in Wohnungsbau und Stadtplanung. Hierzu dienen nachfolgend die ausgewählten aktuellen Materialien:

- WHO-Gesundheitshinweise zur Prävention hitzebedingter Gesundheitsschäden – Neue und aktualisierte Hinweise für unterschiedliche Zielgruppen (2019)
- Klimawandel und Bildung. Unterschiedliche Bildungsmodule für verschiedene Berufsgruppen (u. a. für Kinder- und Jugendärztinnen und -ärzte, Medizinische Fachangestellte und Pflegekräfte, Jugendarbeit) im Gesundheitswesen der Ludwig-Maximilans-Universität München (2020–2022)
- Handlungsfeld Hitze der Deutschen Allianz Klimawandel und Gesundheit e. V. (2022)
- Klima-Mensch-Gesundheit. Webseite der Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung, u. a. auch zu Hitze und Hitzeschutz (2022)
- Klimawandel und Gesundheit: Tipps für sommerliche Hitze und Hitzewellen. Deutscher Wetterdienst/Umweltbundesamt-Ratgeberbroschüre (2019)
- Der Hitzeknigge: Tipps für das richtige Verhalten bei Hitze. Umweltbundesamt-Broschüre zum Hitzeschutz und zur Vorsorge (2021)
- Arbeitshilfe zur Entwicklung und Implementierung eines Hitzeaktionsplans für Kommunen der Hochschule Fulda (2023)
- Bund/Länder-Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit (2017)

Diese Zusammenstellung ist eine Auswahl und hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Qualifizierungstools zu Hitze und Gesundheit, wie z. B. die Bildungsmaterialien der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) oder der Deutschen Allianz Klimawandel und Gesundheit (KLUG), sind verfügbar. Im Folgenden soll eine Auswahl vorgestellt werden.

Erste Hitzeaktionspläne

Die HAP-Handlungsempfehlungen [64] wurden seit ihrer Veröffentlichung 2017 kontinuierlich und vielseitig über diverse Kommunikationskanäle gestreut, auf unterschiedlichen Veranstaltungen dem Fachpublikum aus Wissenschaft und öffentlicher Verwaltung sowie der erweiterten Fachöffentlichkeit wie Stakeholdern vorgestellt (z. B. auf nationalen Fachtagungen, Konferenzen und Fort- und Weiterbildungen des Öffentlichen Gesundheitsdienstes (ÖGD)) und in verschiedenen Journalen publiziert. Darüber hinaus erhielten 2021/2022 einige Kommunen und Länder erste Beratungen für die konkrete HAP-Umsetzung durch die Hochschule Fulda, durch Landesinstitutionen, wie das NRW-Landeszentrum Gesundheit, durch das Zentrum Klimaanpassung und andere Forschungs-, Beratungs- und Nichtregierungsorganisationen.

Die oben beschriebene Online-Erhebung 2020 zeigte, dass die Befragten die HAP-Handlungsempfehlungen überwiegend positiv als eine hilfreiche Basis für ihre Arbeit und einen gut verständlichen und praktikablen Leitfaden für einen HAP betrachten. In einigen Bundesländern und Kommunen konnten bereits eine Reihe von Impulsen und Entwicklungen angestoßen bzw. erste gesundheitsbezogene Anpassungsmaßnahmen zur Hitzeprävention initiiert werden [70]. Seither wurden auch die ersten Konzepte für HAP auf kommunaler Ebene auf der Basis der Handlungsempfehlungen erarbeitet, wie Infobox 3 verdeutlicht.

Infobox 3
Auswahl von ersten Hitzeaktionsplänen

Seit der Veröffentlichung der Bund/Länder-Handlungsempfehlungen zur Erstellung von Hitzeaktionsplänen (HAP) in 2017 sind bis Ende 2022, überwiegend unterstützt durch unterschiedliche Förderprogramme der Projektfinanzierung des Bundes, erste HAP auf kommunaler Ebene erarbeitet worden. Dazu gehören u. a.:

- Offenbach am Main 2020
- Mannheim 2021
- Köln 2022: HAP speziell für ältere Menschen
- Worms 2022
- Land Brandenburg 2022: Gutachten für einen HAP
- Land Berlin 2022: Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin (erste Musterhitzeschutzpläne für die ambulante und stationäre Pflege, Praxen und den Öffentlichen Gesundheitsdienst)
- Land Hessen 2023: Hessischer Hitzeaktionsplan

Die Hitze-Toolbox nach Schweizer Vorbild

Basierend auf der Ursprungsvorlage aus der Schweiz von 2017 [80] wurde durch das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit die Hitze-Toolbox Bayern erarbeitet [81]. Auf übersichtlichen Faktenblättern gibt sie beispielhaft eine orientierende Unterstützung bei der Gestaltung, Planung und Erstellung von HAP. Zudem werden erfolgreiche Beispiele aus der Umsetzung vorgestellt [81]. Die Erfahrungen der Hitzeaktionsplanung aus der Schweiz zeigen, dass eine erfolgreiche Prävention sowohl auf einer Vielzahl von Maßnahmen basiert (vor, während und nach dem Sommer), als auch gesundheitsfördernd die individuelle Gesundheitskompetenz stärkt.

Vor allem in den wärmeren Regionen der Westschweiz wurde in den letzten Jahren eine Reduktion des hitzebedingten Sterberisikos beobachtet. Es gibt Hinweise darauf, dass die kantonalen HAP und somit die koordinierten Aktivitäten zur Prävention von negativen Hitzeauswirkungen auf die Bevölkerung zu dieser Reduktion beigetragen haben. Generell wichtig erscheint die gezielte Information der Bevölkerung über hitzebedingte Gesundheitsrisiken. Die diversen Projekte zur Untersuchung der Auswirkungen von Hitze auf die Gesundheit in der Schweiz haben in den letzten Jahren zu einer Verbesserung der Wissens- und Handlungsgrundlagen geführt. Die Präsentation und Verbreitung der Ergebnisse auf Stakeholder-Meetings und in der breiten Öffentlichkeit via Medien hat maßgeblich zur Bewusstseinsschärfung für diese Thematik beigetragen [80].

Erste Evaluationen berichten von Erfolgen für die Regionen mit HAP gegenüber denen mit vereinzelten Maßnahmen [80]. Dies entspricht internationalen Erfahrungen, auch wenn bislang nur wenige Studien zur HAP-Evaluation vorliegen [82]. Für Rom (Italien) wird allerdings auch schon von Erfolgen eines Programms („Long Live the Elderly") berichtet [68], welches darauf beruht nachbarschaftliche, ehrenamtliche Helferinnen und Helfer einzubinden, dem sogenannten Buddy-System. Dies muss sich in Deutschland erst noch entwickeln.

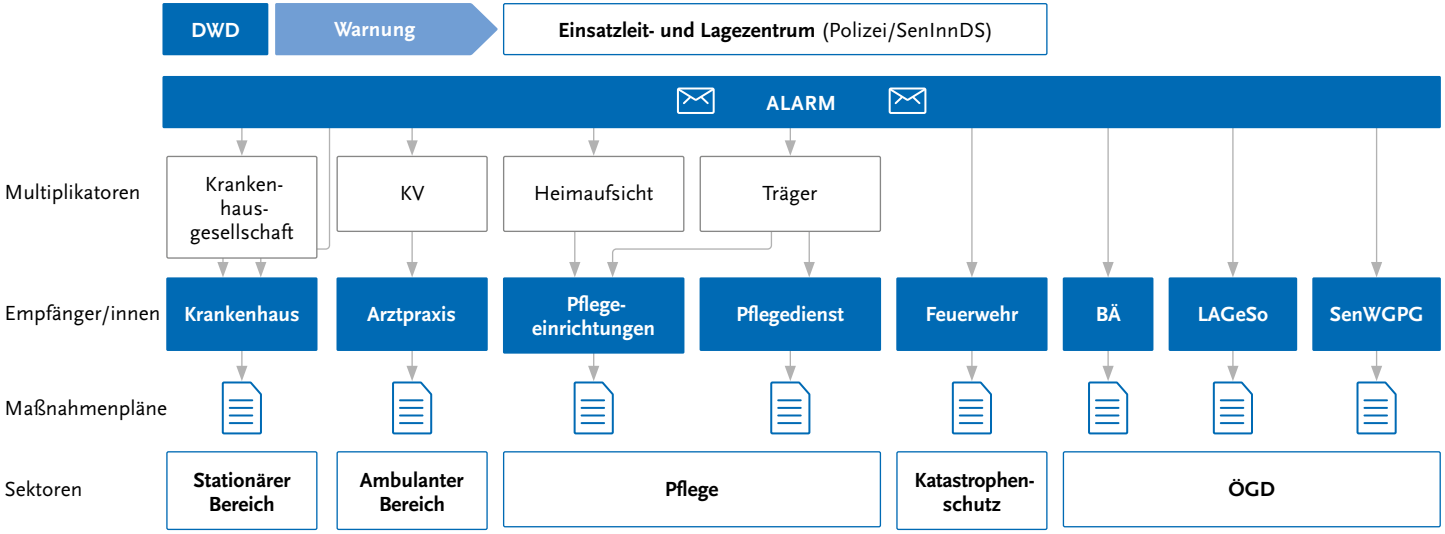
Erfahrungen aus dem Pflegesektor

Als Reaktion auf hitzebedingte Sterbefälle im Sommer 2003 wurden in Hessen ein Hitzewarnsystem und ein Maßnahmenpaket für stationäre Einrichtungen in der Alten- und Behindertenpflege zum Schutz von vulnerablen Personen während Hitzeperioden entwickelt. Dies wurde von einem interdisziplinären Kreis von Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern und in der Pflege involvierten Akteurinnen und Akteuren vorangetrieben [83]. Die praktikablen Handlungsempfehlungen, die 2009 erstmals veröffentlicht und 2017 aktualisiert wurden, decken Themenbereiche von der Identifizierung besonders gefährdeter Bewohnerinnen und Bewohner bis zu Hitzeschutz-Maßnahmen in der Betreuung und Pflege ab. Auch Möglichkeiten zur Regulierung der Raumtemperatur und des Raumklimas werden dargestellt. Seit 2004 überprüft und berät die Hessische Betreuungs- und Pflegeaufsicht an Hitzewarntagen stationäre Einrichtungen zu Sofortmaßnahmen, legitimiert durch einen Erlass des Hessischen Sozialministeriums. Die Ergebnisse werden dokumentiert. Es wird berichtet, dass sich seit der Einführung dieses Systems gesundheitsbezogener Hitzeschutz in den Betreuungs- und Pflegeeinrichtungen in Hessen maßgeblich etabliert hat [83].

Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin

Das Pilotprojekt „Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin", das im März 2022 ins Leben gerufen wurde, priorisiert Hitzeschutzmaßnahmen im Gesundheits- und Pflegesektor, die in einer akuten Hitzesituation den Schutz vulnerabler Bevölkerungsgruppen erhöhen [73]. Die Bildung eines essenziellen, interdisziplinären Akteurs-Netzwerks mit der Zentralsetzung von Hitzeprävention und -anpassung im medizinischen Bereich gelang über die Verantwortlichkeit, Einsicht und Initiative der Akteurinnen und Akteure im Gesundheitssektor. Vom Akteurs-Netzwerk selbst wurden die Hitze-Warnkaskade für den Gesundheitssektor (Abbildung 8) und die konkreten Interventionen entwickelt, die in sektorspezifischen Maßnahmenplänen festgehalten wur-

Abbildung 8
Etablierte Warnkette in der Pilotphase des Aktionsbündnisses Hitzeschutz Berlin
Quelle: Barker [84]



BÄ = Bezirksämter, DWD = Deutscher Wetterdienst, KV = Kassenärztliche Vereinigung, LAGeSO= Landesamt für Gesundheit und Soziales, ÖGD = Öffentlicher Gesundheitsdienst, SenInnDS = Senatsverwaltung für Inneres, Digitalisierung und Sport, SenWGPG = Senatsverwaltung für Wissenschaft, Gesundheit, Pflege und Gleichstellung

den [73, 84]. Das Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin und seine Erfahrungswerte können als Beispiel für andere Städte, Kreise und Bundesländer hilfreich sein, konkret vor allem auch die Muster-Hitzeschutzpläne für verschiedene Einrichtungen, die als niedrigschwellige Checklisten konzipiert wurden.

3. Ausblick: Handlungs- und Forschungsbedarfe

Aktuelle Klimaprojektionen lassen für Mitteleuropa vermuten, dass sich die Eintrittswahrscheinlichkeit von Hitzeperioden bis zum Ende des Jahrhunderts um mehr als das Doppelte erhöht und sie um 30 Prozent länger andauern könnten. Als Folge ist zu erwarten, dass die Hitzebelastung in einer alternden deutschen Gesellschaft zunehmen wird und daher auch hitzebedingte Krankheitssymptome und Sterbefallzahlen weiter ansteigen könnten, wenn keine effektiven Gegenmaßnahmen ergriffen werden [85].

Zunehmende und intensivere Hitzeperioden könnten dazu führen, dass Gesundheitseinrichtungen ihren Aufgaben zeitweise nicht in vollem Umfang nachkommen können, weil sie überlastet sind oder die notwendige Infrastruktur ausfällt. Unbestritten ist, dass der Klimawandel und die wachsenden Herausforderungen durch extreme Hitze mittelfristig voraussichtlich erhebliche zusätzliche Kosten für das Gesundheitswesen verursachen werden, die zum einen durch die Versorgung von Patientinnen und Patienten, aber auch durch Aufklärungskampagnen, die Anpassung der Infrastruktur und die Schulung von Personal entstehen. Langfristig könnten die Kosten für das Gesund-

heitswesen aber auch wieder sinken, sofern Präventionsmaßnahmen erfolgreich umgesetzt werden [85].

Verhältnispräventive Anpassungsmaßnahmen an hohe Temperaturen und Hitzeperioden, wie die Schaffung von Grünanlagen und Parks, bringen einerseits Vorteile für das lokale Klima bzw. Stadtklima, andererseits leisten sie einen Beitrag für die Gesundheit der Bevölkerung u. a. durch die Verbesserung der Luftqualität und als Erholungsräume. Darüber hinaus resultieren aus einem klimafreundlichen Individualverhalten (Verhaltensprävention) neben dem Klimaschutz in der Regel auch substanzielle eigene gesundheitliche Vorteile, sogenannte Health Co-Benefits (siehe auch [10]). Verhaltenspräventive Empfehlungen, die außerdem klimafreundlich sind, beinhalten also auch Potenziale zur Gesundheitsförderung. Die Offenheit und auch das Verständnis für die Notwendigkeit von HAP ist innerhalb der Gesundheitsberufe, den Verbänden im Gesundheits- und Pflegebereich, im Öffentlichen Gesundheitsdienst und in den Kommunen zuletzt sehr deutlich gewachsen.

Hitzeschutz muss stets im Kontext von Klimaschutz gedacht werden. Letztendlich ist Klimaschutz insbesondere auch nachhaltiger Gesundheitsschutz.

3.1 Handlungsempfehlungen

Es ist nach wie vor notwendig, den gesundheitsbezogenen Hitzeschutz und die Hitzeprävention in Deutschland zu verbessern. Dafür ist erforderlich, (a) das übergeordnete Strukturdefizit des Öffentlichen Gesundheitsdienstes zu adressieren, (b) Hitzeaktionspläne, die akute und mittel- bis langfristige Maßnahmen der acht Kernelemente integrieren, systematisch und flächendeckend umzusetzen und (c) Hitzeschutz/Hitzevorsorge vor allem im Gesundheitssektor und in der Allgemeinheit zu verankern. Konkrete Empfehlungen zu Maßnahmen in den Handlungsfeldern Verhältnisprävention, Gesundheitsförderung, -versorgung und -schutz, Katastrophenschutz, Bildung und Weiterbildung, Gesundheitsaufklärung und Kommunikation, Surveillance, Bau- und Stadtplanung und Arbeitsschutz, die zu diesen drei Zielen beitragen, sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Sie reichen von der Setzung politischer Rahmenbedingungen für die Umsetzung von HAP über die aktive Einbindung der Gesundheitsakteurinnen und -akteure bis hin zur Überprüfung von Bau- und Arbeitsschutzgesetzen.

Umsetzungs- und Begleitforschung bei konkreten Projekten trägt dazu bei herauszufinden, welche Faktoren die Umsetzung von HAP und gesundheitsbezogenen Hitzeschutzmaßnahmen in relevanten Einrichtungen, Kommunen, Landkreisen und Bundesländern fördern und welche sie erschweren. Die Ergebnisse helfen, den Umsetzungsprozess in neuen Projekten gezielt fördern zu können. Ein kontinuierliches Monitoring und die Evaluation von HAP (sowohl Prozess- als auch Wirksamkeitsevaluierung) ist erforderlich, um die Wirksamkeit von HAP und der integrierten Maßnahmen im gesundheitsbezogenen Hitzeschutz zu bestimmen (Tabelle 3). Sie können Aufschluss darüber geben, welche Faktoren Einfluss auf die Anpassungsfähigkeit und Anpassungsmöglichkeit der Bevölkerung an hohe Temperaturen und Hitze haben und welche Maßnahmen hilfreich sind, um die Bevölkerung in der Adaptation zu unterstützen und resilienter zu machen.

Tabelle 3
Handlungsempfehlungen zur Stärkung des gesundheitsbezogenen Hitzeschutzes in Deutschland (Stand: Ende Mai 2023)

Ziel	Maßnahme	Ansatzpunkt	Akteursebene	Umsetzbarkeit	Handlungsfeld
Systematische und flächendeckende Erstellung und Umsetzung von Hitzeaktionsplänen (HAP)	Einrichtung einer zentralen Koordinierungsstelle, finanzielle Förderung für Kommunen durch Bund und Länder ermöglichen, erleichtern und breiter aufstellen	Einzelne Kommunen haben bereits HAP erstellt und beginnen diese umzusetzen; es gibt bereits Good-Practice-Beispiele für die Erstellung	Bund, Länder und Kommunen	In den Kommunen von personellen und finanziellen Ressourcen sowie von regulativen Vorgaben wie ÖGD-Gesetzen der Länder und Bundesgesetzgebung abhängig	Verhältnisprävention, Gesundheitsförderung, Gesundheits- und Katastrophenschutz
Stärkung des Gesundheitssektors in seiner zentralen Rolle im gesundheitsbezogenen Hitzeschutz und der entsprechenden Vorsorge	Aktivierung von Gesundheitsakteurinnen und -akteuren als zentraler Pfeiler der HAP, vor allem für die Umsetzung von akutpräventiven Anpassungsmaßnahmen	Erste Aktionsbündnisse im Gesundheitssektor [84]	Gesundheitseinrichtungen, Pflegeeinrichtungen und Pflegedienste, Hausärztinnen und -ärzte, Öffentlicher Gesundheitsdienst, Feuerwehr und Notdienste, Vereinigungen und Verbände, Ehrenamt	Aus der ärztlichen Verantwortung heraus; Eigeninitiative der Akteurinnen und Akteure	Gesundheitsversorgung
Verankerung von Problembewusstsein und Kompetenz im Umgang mit Hitze in der Bevölkerung	Kommunikationsstrategie	Vielfältiges Informationsmaterial ist bereits vorhanden	Bund, Länder und Kommunen	Abstimmung von Bund, Ländern und Kommunen, unterschiedliche Kanäle erforderlich	Gesundheitsaufklärung, Gesundheitsförderung, Gesundheitsschutz
Gesundheitseffekte infolge von Hitzebelastungen zeitnah kleinräumig sowie in Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen einschätzen	Zeitnahes Hitze-Monitoring der Mortalität ausbauen, Monitoring der Morbidität und Arbeitssituation in Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen bei Hitze etablieren	Zeitnahe Mortalitätssurveillance am Robert Koch-Institut, HEAT-Projekte in Hessen [15]	Bund, Länder und Kommunen	Aufwand für die Erhebung, Analyse und Speicherung der Daten	Surveillance
Hitzeresilientes Gesundheitssystem	Investitionen in das Gesundheitssystem zur Stärkung der Zuverlässigkeit von Infrastrukturen bei Hitze	Bestehende Krankenhausalarm- und Einsatzplanung (KAEP)	Bund, Länder, Einrichtungen	Fördermöglichkeiten bisher begrenzt	Finanzierung und Ressourcen
Hitzekompetentes Gesundheitspersonal	Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten im Gesundheitssystem im Bereich Hitzeschutz/ Vorsorge, Präventionskampagnen [71, 77, 78, 85]	Bestehende Ausbildungsangebote und Materialien, zum Beispiel Projekte der LMU zu Hitzeschutz in der Pflege	Bund, Länder, Einrichtungen	Bestehendes Schulungsangebot enthält bisher wenig zu Hitzeschutz	Bildung

Tabelle 3 *Fortsetzung nächste Seite*

Ziel	Maßnahme	Ansatzpunkt	Akteursebene	Umsetzbarkeit	Handlungsfeld
Hitzeresiliente Gebäudestruktur mit besonderem Augenmerk auf Krankenhäuser und Pflegeheime	Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung der Bau- und Arbeitsschutzgesetze [71] im Hinblick auf ihre Wirksamkeit für gesundheitsbezogenen Hitzeschutz	Besonderer Schutz von Mitarbeitenden im Gesundheitssystem erforderlich, bestehende Gesetzgebung zu passiver Kühlung von Gebäuden sollte beachtet werden	Bund und Länder	Umsetzung auf der Basis der Empfehlungen des European Network Architecture for Health [86]	Bau- und Stadtplanung, Arbeitsschutz
Fortlaufende, evidenzbasierte Umsetzung und Weiterentwicklung von HAP	Evaluierung von HAP und entsprechender Maßnahmen	Kommunen, in denen ein HAP bereits besteht und umgesetzt wird, Anlehnung an Methodik von WHO Europa, auch anderer Regionen, beispielsweise England [87, 88]	Beobachtung und Analyse der HAP-Umsetzung in Ländern und Kommunen durch den Bund	Zuständigkeitsverteilung zwischen den Bereichen Umwelt und Gesundheit unklar	Verhältnisprävention, Gesundheitsförderung, Gesundheits- und Katastrophenschutz
Evidenzbasierte Behandlung von Patientinnen und Patienten in Hinblick auf Risiken im Zusammenhang mit Hitze	Konzeptentwicklung zum Umgang mit hitzesensitiven Medikamenten, z. B. Zusammenfassung der Evidenz, Machbarkeitsstudien, Entwicklung einer Warn-App	Wissensstand zu Wechselwirkungen von Medikamenten und hohen Temperaturen	Bund und Länder	Guidelines/Standards für die Medikamentengabe bei Hitze (Dosierungsanpassung bis Aussetzung) existieren bisher nicht	Weiterbildung, Kommunikation

HAP = Hitzeaktionspläne, LMU = Ludwig-Maximilians-Universität, ÖGD = Öffentlicher Gesundheitsdienst, WHO = World Health Organization

Tabelle 3 *Fortsetzung*
Handlungsempfehlungen zur Stärkung des gesundheitsbezogenen Hitzeschutzes in Deutschland (Stand: Ende Mai 2023)

3.2 Forschungsbedarfe in Medizin, Epidemiologie und Versorgungsforschung

Auch wenn im Bereich „Gesundheitsauswirkungen von hohen Temperaturen und Hitze" die breite Basis an Evidenz in den letzten Jahren gestärkt wurde, gibt es nach wie vor eine Reihe von offenen Forschungsfragen zu den verschiedenen relevanten Themen- und Handlungsfeldern. Entsprechend der hier gelisteten und zukünftig auftretenden Forschungsfragen ist es wichtig, dass auch Förderprogramme der jeweils zuständigen Behörden entsprechend ausgestattet und inhaltlich ausgerichtet werden.

Medizinisch/epidemiologische Fragestellungen

Genauere Erkenntnisse sind vor allem notwendig zu den Auswirkungen von hohen Temperaturen bzw. Hitze auf die Morbidität: Hier stellen sich Fragen nach der Rolle von Vorerkrankungen (z. B. Herzinsuffizienz, Herzinfarkte, Schlaganfälle, Diabetes, Nierenerkrankungen, COPD, Asthma) und eine Abschätzung der Anzahl Betroffener, z. B. über die Berechnung der Anzahl verlorener Lebensjahre (years of life lost, YLLs) und der entstandenen Anzahl von Lebensjahren mit Behinderung oder Krankheit (years lived with disability or disease, YLDs). Mögliche Langzeiteffekte von hohen Temperaturen und Hitze wurden bisher noch kaum untersucht. Auch die Frage, wie genau Schwangerschafts-

komplikationen mit der Temperatur zusammenhängen und wie die pathophysiologischen Mechanismen aussehen, ist noch nicht im Detail beantwortet. Interaktionen bei der kombinierten Einnahme verschiedener hitzesensitiver Medikamente bedürfen weiterer Untersuchung, zusammen mit der Entwicklung entsprechender Präventionsmaßnahmen. Auch die Frage nach der Auswirkung zusätzlicher Umweltfaktoren, die die Auswirkungen von Hitze auf die Morbidität und Mortalität stark beeinflussen (Interaktionen und Synergien), sollte näher untersucht werden.

Versorgungsforschung

Laut der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland von 2021 [85] untersuchen nur wenige Studien die Folgen des Klimawandels auf das Gesundheitssystem oder die Gesundheitswirtschaft; auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Im Kontext der Versorgungsforschung stellt sich die Frage, welche Rolle hitzebedingte Sterbefälle in Krankenhäusern, in Betreuungseinrichtungen und im privaten Wohnumfeld spielen [85]. Für die Vorbereitung von Gesundheitsdiensten auf die Auswirkungen von Hitzewellen ist es wichtig zu untersuchen, wie viele Patientinnen und Patienten während Hitzeperioden zusätzlich in Arztpraxen und Notaufnahmen versorgt werden müssen und welche Kosten damit verbunden sind. Genauere Kenntnisse darüber, inwiefern Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Gesundheits- und Pflegeeinrichtungen bei hohen Temperaturen (v. a. auch in den Innenräumen) in ihrer Arbeitsfähigkeit eingeschränkt sind, sind zu ihrem Schutz und zur Gewährleistung der medizinischen Versorgung und der Pflege während Hitzeperioden notwendig.

4. Fazit

Mit fortschreitendem Klimawandel wird eine weitere Zunahme der Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzeperioden in Deutschland erwartet. Vor allem auf besonders extreme Ereignisse sind die Bevölkerung, das Gesundheitssystem und die Kommunen nicht hinreichend vorbereitet. Hitzeereignisse sind als zunehmendes Gesundheitsrisiko ernst zu nehmen und Bund, Länder und Kommunen sowie die Einrichtungen des Gesundheitswesens und der Pflege stehen in der Pflicht, Maßnahmen zur Risikominimierung unter Einbeziehung neuer Erkenntnisse zu stärken bzw. zu ergreifen und den Aufbau resilienter Strukturen zu unterstützen [84]. Der Gesundheitssektor sollte dabei eine zentrale Rolle spielen.

Korrespondenzadresse
Claudia Winklmayr
Max Delbrück Center | MDC-BIMSB
Hannoversche Str. 28
10115 Berlin
E-Mail: claudia.winklmayr@mdc-berlin.de

Zitierweise
Winklmayr C, Matthies-Wiesler F, Muthers S, Buchien S, Kuch B et al. (2023)
Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention.
J Health Monit 8(S4): 3–34.
DOI 10.25646/11645

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter:
www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024).

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren danken Nathalie Nidens, Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit e. V., für ihren Beitrag zum Abschnitt über das Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin, die Grafik dazu, sowie die Mitarbeit an Tabelle 2. Sie danken Alexandra Schneider, Institut für Epidemiologie, Helmholtz Zentrum München, für wertvolle Hinweise und Kommentare zum Abschnitt über Hitzeperioden und Morbidität.

Das RKI-Koordinationsteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Butsch C, Beckers LM, Nilson E et al. (2023) Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel. J Health Monit 8(S4):35–60. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)
2. Romanello M, Di Napoli C, Drummond P et al. (2022) The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Health at the mercy of fossil fuels. Lancet 400(10363):1619–1654
3. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al. (Hrsg) (2021) Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC, Cambridge. www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-6 (Stand: 20.06.2023)
4. Russo S, Sillmann J, Fischer EM (2015) Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. Environ Res Lett 10(12):124003
5. Becker FN, Fink AH, Bissolli P et al. (2022) Towards a more comprehensive assessment of the intensity of historical European heat waves (1979–2019). Atmos Sci Lett 23:e1120
6. Staiger H, Laschewski G, Grätz A (2012) The perceived temperature – A versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: Scientific basics. Int J Biometeorol 56(1):165–176.
7. Nairn JR, Fawcett RJ (2014) The excess heat factor: A metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. Int J Environ Res Public Health 12(1):227–253
8. Muthers S, Matzarakis A (2018) Hitzewellen in Deutschland und Europa. In: Lozán JL, Breckle SW, Graßl H et al. (Hrsg) Warnsignal Klima: Extremereignisse. www.warnsignale.uni-hamburg.de, Elektron. veröffent. www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/buchreihe/die-wetterextreme/kapitel-2-3-hitzewellen-in-deutschland-und-europa (Stand: 21.06.2023)
9. Robinson PJ (2001) On the definition of a heat wave. J Appl Meteorol Climatol 40(4):762–775
10. Hertig, E, Hunger I, Kaspar-Ott I et al. (2023) Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023. J Health Monit 8(S3):7–35. https://edoc.rki.de/handle/176904/11074 (Stand: 22.06.2023)
11. Brienen S, Walter A, Brendel C et al. (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/TFSPTBerichte/SPT101.html (Stand: 22.06.2023)

12. Schlegel I, Muthers S, Matzarakis A (2021) Einfluss des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen. Umweltbundesamt (Hrsg) Umwelt & Gesundheit 04/2021. www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/einfluss-des-klimawandels-auf-die-morbiditaet (Stand: 21.06.2023)
13. Statistisches Bundesamt (2022) Todesursachenstatistik. Sterbefälle, Sterbezifffern (ab 1998). www.gbe-bund.de (Stand: 11.07.2023)
14. Winklmayr C, Muthers S, Niemann H et al (2022) Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. Dtsch Arztebl Int 119(26):451–457
15. Siebert H, Uphoff H, Grewe HA (2019) Monitoring hitzebedingter Sterblichkeit in Hessen. Bundesgesundheitsbl 62(5):580–588
16. Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023) Sterbefallzahlen und Übersterblichkeit. www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Corona/Gesellschaft/bevoelkerung-sterbefaelle.html (Stand: 21.06.2023)
17. EuroMomo (2023) Methods. www.euromomo.eu/how-it-works/methods (Stand: 21.06.2023)
18. Koppe C, Jendritzky G (2005) Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure. Meteorologische Zeitschrift 14(2):271–278
19. an der Heiden M, Muthers S, Niemann H et al. (2020) Heat-related mortality: An analysis of the impact of heatwaves in Germany between 1992 and 2017. Dtsch Arztebl Int 117(37):603–609
20. Gasparrini A, Armstrong B (2011) The impact of heat waves on mortality. Epidemiology 22(1):68–73
21. an der Heiden M, Muthers S, Niemann H et al. (2019) Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. Bundesgesundheitsbl 62(5):571–579
22. Winklmayr C, an der Heiden M (2022) Hitzebedingte Mortalität in Deutschland 2022. Epid Bull 42:3–9
23. Axnick M (2021) Hitzebedingte Mortalität in Berlin. Stadtforschung und Statistik: Zeitschrift des Verbandes Deutscher Städtestatistiker 34(1):92–97
24. Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019) Bevölkerung im Wandel: Annahmen und Ergebnisse der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2019/Bevoelkerung/pressebroschuere-bevoelkerung.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 21.06.2023)
25. Schneider A, Schuh A, Maetzel FK et al. (2008) Weather-induced ischemia and arrhythmia in patients undergoing cardiac rehabilitation: Another difference between men and women. Int J Biometeorol 52(6):535–547
26. Muthers S, Laschewski G, Matzarakis A (2017) The summers 2003 and 2015 in south-west Germany: Heat waves and heat-related mortality in the context of climate change. Atmosphere 8(11):224
27. Oke TR (1973) City size and the urban heat island. Atmos Environ 7(8):769–779
28. Gabriel KM, Endlicher WR (2011) Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. Environ Pollut 159(8-9):2044–2050
29. Di Napoli C, Pappenberger F, Cloke HL (2018) Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). Int J Biometeorol 62(7):1155–1165
30. Ebi KL, Capon A, Berry P et al. (2021) Hot weather and heat extremes: Health risks. Lancet 398(10301):698–708
31. World Health Organization (WHO) Regionalbüro für Europa (2019) Gesundheitshinweise zur Prävention hitzebedingter Gesundheitsschäden: Neue und aktualisierte Hinweise für unterschiedliche Zielgruppen. WHO. https://apps.who.int/iris/handle/10665/341625 (Stand: 21.06.2023)
32. Sorensen C, Hess J (2022) Treatment and Prevention of Heat-Related Illness. N Engl J Med 387(15):1404–1413
33. Mücke HG (2021) Gesundheitsrisiken durch den Klimawandel. Gute Arbeit 8–9/2021
34. Bose-O'Reilly S, Daanen H, Deering K et al. (2021), COVID-19 and heat waves: New challenges for healthcare systems. Environ Res 198:111153

35. World Health Organization (WHO) (2018) Heat and Health. WHO. www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health (Stand: 21.06.2023)

36. Huber V, Krummenauer L, Peña-Ortiz C et al. (2020) Temperature-related excess mortality in German cities at 2 °C and higher degrees of global warming. Environ Res 2020. 186:109447

37. Phung D, Thai PK, Guo Y et al. (2016) Ambient temperature and risk of cardiovascular hospitalization: An updated systematic review and meta-analysis. Sci Total Environ 550:1084–1102

38. Chen K, Breitner S, Wolf K et al. (2019) Projection of temperature-related myocardial infarction in Augsburg, Germany: Moving on from the Paris Agreement on climate change. Dtsch Arztebl Int 116(31-32):521–527

39. Sun Z, Chen C, Xu D et al. (2018) Effects of ambient temperature on myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis. Environ Pollut 241:1106–1114

40. Breitner S, Pickford R, Schneider A (2021) Interaktion von Temperatur und Luftschadstoffen: Einfluss auf Morbidität und Mortalität. In: Günster C, Klauber J, Robra BP et al. (Hrsg) Versorgungsreport Klima und Gesundheit. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Berlin, S. 105–117. www.wido.de/publikationen-produkte/buchreihen/versorgungs-report/klima-und-gesundheit (Stand: 21.06.2023)

41. Breitner-Busch S, Mücke HG, Schneider A et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft. J Health Monit 8(S4):111–131. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

42. Hoffmann C, Hanisch M, Heinsohn JB et al. (2018) Increased vulnerability of COPD patient groups to urban climate in view of global warming. Int J Chron Obstruct Pulmon Dis 13:3493–3501

43. Lavigne E, Gasparrini A, Wang X et al. (2014) Extreme ambient temperatures and cardiorespiratory emergency room visits: Assessing risk by comorbid health conditions in a time series study. Environ Health 13(1):5

44. Samuels L, Nakstad B, Roos N et al. (2022) Physiological mechanisms of the impact of heat during pregnancy and the clinical implications: Review of the evidence from an expert group meeting. Int J Biometeorol 66(8):1505–1513

45. Syed S, O'Sullivan TL, Phillips KP (2022) Extreme heat and pregnancy outcomes: A scoping review of the epidemiological evidence. Int J Environ Res Public Health 19(4):2412

46. Chersich MF, Pham MD, Areal A et al. (2020) Associations between high temperatures in pregnancy and risk of preterm birth, low birth weight, and stillbirths: Systematic review and meta-analysis. BMJ 371:m3811

47. Kälin P, Kondo Oestreicher M, Pfluger T (2007) Sommerliche Hitzewellen: Die Medikation von Risikopersonen überprüfen. Swiss Medical Forum 2007/31

48. Kuch B (2021) Der Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten von Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Handlungsansätze und die besondere Herausforderung durch Arzneimittel-wechsel-wirkungen. In: Günster C, Klauber J, Robra BP et al. (Hrsg) Versorgungsreport Klima und Gesundheit. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Berlin, S. 53–62. www.wido.de/publikationen-produkte/buchreihen/versorgungs-report/klima-und-gesundheit (Stand: 21.06.2023)

49. Geisslinger G, Menzel S, Gudermann T et al. (Hrsg) (2020) Mutschler Arzneimittelwirkungen: Pharmakologie-Klinische Pharmakologie-Toxikologie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart

50. Pharmazeutische Zeitung (2010) Schmerzpflaster: Überdosierung durch Hitze. Pharmazeutische Zeitung 30/2010. www.pharmazeutische-zeitung.de/ausgabe-302010/ueberdosierung-durch-hitze (Stand: 21.06.2023)

51. Chen K, Dubrow R, Breitner S et al. (2022) Triggering of myocardial infarction by heat exposure is modified by medication intake. Nat Cardiovasc Res 1(8):727–731

52. Fischer von Weikersthal G (2021) SGLT-2-Inhibition bei chronischer Niereninsuffizienz: Nicht nur beim Diabetes effektiv. Dtsch Arztebl 118(42):A-1940

53. Goldenberg RM, Berard LD, Cheng AYY et al. (2016) SGLT2 inhibitor–associated diabetic ketoacidosis: clinical review and recommendations for prevention and diagnosis. Clin Ther 38(12):2654–2664

54. Bundesministerium für Gesundheit (2022) Arzneimittel richtig aufbewahren und entsorgen. www.bundesgesundheitsministerium.de/arzneimittelentsorgung-und-aufbewahrung.html (Stand: 21.06.2023)

55. Falhammar H, Lindh JD, Calissendorff J et al. (2018) Differences in associations of antiepileptic drugs and hospitalization due to hyponatremia: A population-based case-control study. Seizure 59:28–33

56. Mattson RH (2004) Cognitive, affective, and behavioral side events in adults secondary to antiepileptic drug use. Rev Neurol Dis 1:Suppl 1:S10–7

57. Bolte G, Dandolo L, Gepp S et al. (demnächst) Klimawandel und gesundheitliche Chancengleichheit: Eine Public-Health-Perspektive auf Klimagerechtigkeit. J Health Monit www.rki.de/jhealthmonit

58. Trbovich MB, Handrakis JP, Kumar NS et al. (2020) Impact of passive heat stress on persons with spinal cord injury: Implications for Olympic spectators. Temperature 7(2):114–128

59. Matzarakis A, Muthers S (2020) Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Public Health Forum 28(1):26–28

60. Robine JM, Cheung SLK, Le Roy S et al. (2008) Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. C R Biol 331(2):171–178

61. Pfafferott J, Becker P (2008) Erweiterung des Hitzewarnsystems um die Vorhersage der Wärmebelastung in Innenräumen. Bauphysik 30(4):237–243

62. Deutscher Wetterdienst (DWD) (2023) Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes. www.hitzewarnungen.de (Stand: 21.06.2023)

63. World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe (2008). Heat-health action plans: Guidance. WHO. www.who.int/publications/i/item/9789289071918 (Stand: 21.06.2023)

64. Straff W, Mücke HG (2017) Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/hap_handlungsempfehlungen_bf.pdf (Stand: 21.06.2023)

65. Die Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. www.bmuv.de/download/deutsche-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel (Stand: 21.06.2023)

66. Mücke HG, Straff W (2020) Empfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen – Handeln für eine bessere Gesundheitsvorsorge. Public Health Forum 28(1):29–32

67. Matthies-Wiesler F, Gabrysch S, Peters A et al. (2019) The Lancet Countdown on health and climate change policy brief für Deutschland. https://klimagesund.de/wp-content/uploads/2021/05/Policy-Brief-2019.pdf (Stand: 21.06.2023)

68. Blättner B, Janson D, Roth A et al. (2020) Gesundheitsschutz bei Hitzeextremen in Deutschland: Was wird in Ländern und Kommunen bisher unternommen? Bundesgesundheitsbl 63(8):1013–1019

69. Kaiser T, Kind C, Dudda L (2021) Bund/Länder-Handlungsempfehlungen zur Erarbeitung von Hitzeaktionsplänen: Bekanntheit und Rezeption in Bundesländern und Kommunen. UMID 01/2021:17–25

70. Kaiser T, Kind C, Dudda L et al. (2021) Klimawandel, Hitze und Gesundheit: Stand der gesundheitlichen Hitzevorsorge in Deutschland und Unterstützungsbedarf der Bundesländer und Kommunen. UMID 01/2021:27–37

71. Matthies-Wiesler F, Herrmann M, Schulz C et al. (2021) The Lancet countdown on health and climate change policy brief für Deutschland. www.klimawandel-gesundheit.de/wp-content/uploads/2021/10/20211020_Lancet-Countdown-Policy-Germany-2021_Document_v2.pdf (Stand: 20.06.2023)

72. Janson D, Kaiser T, Kind C et al. (2023) Analyse von Hitzeaktionsplänen und gesundheitlichen Anpassungsmaßnahmen an Hitzeextreme in Deutschland. Umweltbundesamt (Hrsg) Umwelt & Gesundheit 03/2023. www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-von-hitzeaktionsplaenen-gesundheitlichen (Stand: 20.06.2023)

73. Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin (2023) Gesundheitsbezogener Hitzeschutz: Das Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin. https://hitzeschutz-berlin.de/ (Stand: 21.06.2023)

74. Hannemann L, Janson D, Grewe HA et al. (2023) Heat in German cities: A study on existing and planned measures to protect human health. J Public Health (Berl.). https://doi.org/10.1007/s10389-023-01932-2

75. Blättner B, Grewe HA, Janson D et al. (2023) Arbeitshilfe zur Entwicklung und Implementierung eines Hitzeaktionsplans für Kommunen. www.hs-fulda.de/fileadmin/user_upload/FB_Pflege_und_Gesundheit/Forschung___Entwicklung/Klimawandel_Gesundheit/Arbeitshilfe_zur_Entwicklung_und_Implementierung_eines_Hitzeaktionsplans_fuer_Kommunen_21.03_final.pdf (Stand: 26.07.2023)

76. Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit (KLUG) (2023) Gemeinsam handeln für Klima und Gesundheit. www.klimawandel-gesundheit.de (Stand: 21.06.2023)

77. Gesundheitsministerkonferenz (GMK) (2020) Beschlüsse der GMK 30.09.2020 – 01.10.2020. TOP 5.1: Der Klimawandel – Eine Herausforderung für das deutsche Gesundheitswesen. Teil 1. Hitzeaktionspläne. www.gmkonline.de/Beschluesse.html?id=1018&jahr=2020 (Stand: 21.06.2023)

78. Bundesärztekammer (2021) Ärztetag für Klimaneutralität des Gesundheitswesens bis 2030. www.bundesaerztekammer.de/presse/aktuelles/detail/aerztetag-fuer-klimaneutralitaet-des-gesundheitswesens-bis-2030 (Stand: 21.06.2023)

79. Böhme C, Franke T, Preuß T et al. (2021) Kooperative Planungsprozesse zur Stärkung gesundheitlicher Belange – Modellhafte Erprobung und Entwicklung von Ansätzen zur nachhaltigen Umsetzung. Umweltbundesamt (Hrsg) Umwelt & Gesundheit 06/2021. www.umweltbundesamt.de/publikationen/kooperative-planungsprozesse-zur-staerkung (Stand: 22.06.2023)

80. Ragettli MS, Röösli M (2019) Hitzeaktionspläne zur Prävention von hitzebedingten Todesfällen – Erfahrungen aus der Schweiz. Bundesgesundheitsbl 62(5):605–611

81. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) (2023) Hitzeaktionspläne in Kommunen – Unterstützung bei der Erstellung von Maßnahmen und Konzepten. Toolbox. LGL. www.bestellen.bayern.de/shoplink/lgl_ges_00090.htm (Stand: 22.06.2023)

82. Benmarhnia T, Bailey Z, Kaiser D et al. (2016) A difference-in-differences approach to assess the effect of a heat action plan on heat-related mortality, and differences in effectiveness according to sex, age, and socioeconomic status (Montreal, Quebec). Environ Health Perspect 124(11):1694–1699

83. Regierungspräsidium Gießen (2022) Betreuungs- und Pflegeaufsicht Hessen. Außergewöhnliche Hitzeperioden. https://rp-giessen.hessen.de/sites/rp-giessen.hessen.de/files/2022-04/broschuere_handlungsempfehlungen_hitzeperioden_bf.pdf (Stand: 22.06.2023)

84. Barker M (2022) Klimawandel als Herausforderung für das Gesundheitswesen. Das Aktionsbündnis Hitzeschutz Berlin. Pädiatrische Allergologie 04/2022:44–47

85. Wolf M, Ölmez C, Schönthaler K et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021, Teilbericht 5: Klimarisiken in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. Umweltbundesamt (Hrsg) Climate Change 24/2021. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_5_cluster_wirtschaft_gesundheit_bf_211027_0.pdf (Stand: 20.06.2023)

86. Matthys S (2021) Klimaresiliente Gesundheitsbauten. www.management-krankenhaus.de/news/klimaresiliente-gesundheitsbauten (Stand: 22.06.2023)

87. Williams L, Erens B, Ettelt S et al. (2019) Evaluation of the Heatwave Plan for England. Final report. Policy Innnovation and Evaluation Research Unit. www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/the-2022-heatwaves-englands-response-and-future-preparedness-for-heat-risk (Stand: 22.06.2023)

88. Howarth C, Armstrong A, McLoughlin N et al. (2023) Policy brief. The 2022 heatwaves: England's response and future preparedness for heat risk. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. www.preventionweb.net/publication/2022-heatwaves-englands-response-and-future-preparedness-heat-risk (Stand: 22.06.2023)

Impressum

Journal of Health Monitoring
www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber
Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur
Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen
Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter, Dr. Kirsten Kelleher,
Dr. Livia Ryl, Simone Stimm

Satz
WEBERSUPIRAN.berlin, Alexander Krönke

Bildnachweis
Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis
Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.

Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S4)
DOI 10.25646/11646.2
Robert Koch-Institut, Berlin

Carsten Butsch[1, 2], Liza-Marie Beckers[3], Enno Nilson[3], Marieke Frassl[3], Nicole Brennholt[4], René Kwiatkowski[5], Mareike Söder[6]

[1] Universität Bonn
Geographisches Institut
[2] Universität zu Köln
Geographisches Institut
[3] Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
[4] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Düsseldorf
Abteilung für Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
[5] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn
Abteilung für Risikomanagement, Internationale Angelegenheiten
[6] Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
Stabsstelle Klima und Boden

Eingereicht: 23.12.2022
Akzeptiert: 26.04.2023
Veröffentlicht: 06.09.2023

Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel

Abstract

Hintergrund: Extremwetterereignisse stellen eine der greifbarsten Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels dar. Sie haben in Zahl und Ausprägung zugenommen und eine weitere Zunahme wird erwartet. Damit gehen unmittelbare und mittelbare negative Folgen für die menschliche Gesundheit einher.

Methode: Überschwemmungsereignisse, Stürme und Dürren werden hier für Deutschland aus systemischer Perspektive auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche analysiert, wobei über das konkrete Schadensereignis hinausgehende Risikokaskaden in den Blick genommen werden, um auch nachgelagerte Folgen darzustellen.

Ergebnisse: Neben den unmittelbaren gesundheitlichen Belastungen durch Extremwetterereignisse, wie Verletzungen, treten langfristige Folgen, wie psychische Belastungsstörungen, auf. Diese Belastungen betreffen bestimmte vulnerable Gruppen, z. B. ältere Menschen, Kinder, Schwangere oder Einsatzkräfte, in besonderem Maße.

Schlussfolgerungen: Der Blick auf die in der internationalen Literatur beschriebenen Risikokaskaden erlaubt es, Vorsorgemaßnahmen für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu entwickeln. Viele Anpassungsmaßnahmen schützen dabei vor unterschiedlichen Risiken gleichzeitig. Neben planerischen Maßnahmen ist dies vor allem auch die Erhöhung der Selbstschutzfähigkeit in der Bevölkerung durch Wissen und die Stärkung sozialer Netzwerke.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

VULNERABILITÄT · ÜBERSCHWEMMUNGEN · STÜRME · DÜRREN · BRÄNDE · KLIMAWANDELANPASSUNG

1. Einleitung

Extreme Wetterereignisse stellen in der öffentlichen Wahrnehmung eine der greifbarsten Auswirkungen des Klimawandels dar. Einzelne Ereignisse, die Katastrophen auslösen, werden häufig mit dem Klimawandel erklärt. Das ist aus wissenschaftlicher Perspektive schwierig, weil sich mit dem Klimawandel zwar die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Extremen verändert, dies aber noch keine hinreichende Erklärung für das jeweilige Einzelereignis darstellt (Infobox). Jedoch deutet vieles darauf hin, dass zumindest einige Arten von Extremwetterereignissen in Frequenz und Magnitude (Ausmaß) aufgrund des anthropogenen Klimawandels zugenommen haben [1]. Damit gehen negative Folgen für die menschliche Gesundheit einher – unmittelbar und mittelbar.

Extremwetterereignisse werden in der Literatur unterschiedlich definiert. Im Bereich der Klimafolgenforschung

Dieser Artikel wurde korrigiert (siehe Corrigendum Seite 60), Stand 06.10.2023

sind zwei Sichtweisen etabliert. Für die erste ist die Seltenheit und hohe Magnitude ausschlaggebend, z. B. eine statistisch zu erwartende Wiederkehrzeit von 100 Jahren oder seltener. Für die zweite sind die Folgen des Ereignisses für die menschliche Gesellschaft (hier: Gesundheit) ausschlaggebend, wenn diese Ereignisse soziale, technische oder Umweltsysteme (zer)stören [2, 3]. Im Folgenden werden beide Sichtweisen verknüpft.

Zunächst wird die klimawandelbedingte Änderung der Frequenz potenziell gesundheitsgefährdender Ereignisse wie Überschwemmungen, Stürme, Dürren und Brände dargestellt. Ausgenommen sind Hitzewellen, denen sich

Es ist zu erwarten, dass durch den Klimawandel Frequenz und Magnitude von Extremwetterereignissen zunehmen.

Infobox
Evidenz: Die Zunahme von Extremwetterereignissen als Folge des Klimawandels

Der sechste Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) konstatiert in seinen zentralen Aussagen, dass sich der anthropogene Klimawandel bereits auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt auswirkt und dass sich die Beweislage für die Zuordnung zum menschlichen Einfluss in den letzten Jahren verstärkt hat [8].

Jedoch kann nicht jedes extreme Wetter- oder hydrologische Phänomen dem Klimawandel zugeordnet werden. Diese Zuordnung ist den Konventionen der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) zufolge erst möglich, wenn sich systembeschreibende Größen (z. B. Temperatur-, Niederschlags- oder Hochwasserkennwerte, hier: Extremwerte) im vieljährigen Mittel merklich verschieben [9]. Dieser Nachweis ist aufgrund der hohen natürlichen Variabilität im Klimasystem, meist recht kurzer Beobachtungsreihen und der Seltenheit von Extremwetterereignissen schwer zu erbringen. Da das Klima auch unter natürlichen Bedingungen auf multidekadischen Zeitskalen schwankt, ist es besonders schwierig, den Anteil des anthropogen verstärkten Klimawandels eindeutig abzugrenzen. Für Deutschland kann eine Änderung in Bezug auf die Ereignistypen Hitze, Dürre, Sturmflut und Flusshochwasser festgestellt werden (Vergangenheitsanalyse, Daten meist seit 1950), dabei nimmt die Robustheit – d. h. die Eindeutigkeit, mit der der Klimawandel als Grund für die Änderungen identifiziert werden kann – der festgestellten Änderungen in der genannten Reihung ab. Nahezu alle gängigen Hitzeindikatoren zeigen signifikante Änderungen mit immer neuen Extremwerten [4, 10], die teilweise dem anthropogenen Beitrag zum Klimawandel zugeordnet werden können [11]. Festgestellte Trends für Dürren sind je nach Dürreindikator mehr oder weniger ausgeprägt. Während meteorologische Kennwerte wie die klimatische Wasserbilanz oder auch der Waldbrandindex vielerorts vergleichsweise klare Änderungen zeigen [12, 13], treten in den hydrologischen Kennwerten nur regional signifikante Trends zutage [14]. Grund sind teilweise kompensierende Effekte innerhalb des hydrologischen Systems, z. B. durch Wasserbewirtschaftung oder Gletscherschmelze. In Bezug auf Flusshochwasser können an vielen Pegeln Zunahmen der jährlichen Höchstabflüsse festgestellt werden. Bei Extremhochwassern in der Größenordnung von 100-jährlichen Ereignissen ist ein entsprechender Nachweis oft nicht zu erbringen (z. B. [15]). Ein ähnliches Bild zeigt sich an den Nordseepegeln in Bezug auf Sturmfluten: Während die jährlichen Sturmfluten hinsichtlich Magnitude zunehmen, ist bei den „sehr schweren Sturmfluten“ mangels vergangener Ereignisse und Daten keine Tendenz auszumachen [16].

Generell gilt: Je extremer und damit seltener ein betrachtetes Ereignis, desto mehr beeinflusst die limitierte Länge von Beobachtungsreihen die Möglichkeiten zum Nachweis von Änderungen. Daher ist es schwer, Änderungen im Auftreten extremer und zerstörerischer Starkregen- bzw. Sturzflutereignisse und Stürme belastbar nachzuweisen [17]. Die erforderlichen raumzeitlich sehr hochauflösenden Datenreihen liegen erst für wenige Jahrzehnte vor. Dies bedeutet jedoch nicht, dass mit dem Klimawandel in Bezug auf diese Größen keine Änderungen einhergehen. Unter Hinzunahme von Klimamodellen konnte z. B. gezeigt werden, dass Niederschlagsereignisse wie jenes, welches im Juli 2021 die Hochwasserkatastrophe in Westdeutschland und Belgien ausgelöst hat, durch den anthropogen verstärkten Klimawandel wahrscheinlicher geworden sind [18].

Extremwetterereignisse haben eine Vielzahl mittelbarer Folgen, die als Risikokaskaden dargestellt werden können.

Winklmayr et al. [4] in einem separaten Artikel dieses Sachstandsberichts widmen. Darauf aufbauend werden die Folgen dieser Ereignisse entlang sogenannter Risikokaskaden analysiert und systematisch unmittelbare und mittelbare Folgen dargestellt.

Extremwetterereignisse werden hier als „dynamischer, zeitlich begrenzter Vorgang, der die normale Funktionsweise eines Systems stört" (eigene Übersetzung nach [2, S. 4]) verstanden. Sie lösen Katastrophen aus, wenn sie auf vulnerable gesellschaftliche Verhältnisse treffen und Menschen, Infrastruktur, Wirtschaft oder die Umwelt in einem Maße schädigen, dass externe Hilfe notwendig wird (in Anlehnung an [5]). Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) befasste sich in einem Sonderbericht mit Vulnerabilität und Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen [5]. Menschliche Gesundheit wird dort als gefährdetes Gut und als potenziell vulnerabilitätssteigernd konzeptualisiert, da Menschen mit Vorerkrankungen von Extremwetterereignissen oftmals stärker betroffen sind.

In Anbetracht der aktuellen Kenntnislage ist trotz bestehender Unsicherheiten aus Vorsorgegründen davon auszugehen, dass mit fortschreitendem Klimawandel meteorologische und hydrologische Extremwetterereignisse in Deutschland an Magnitude und Frequenz in Zukunft weiter zunehmen werden (Infobox) [1, 6]. Die Belege sind für temperatur- und meeresspiegelgesteuerte Wirkungsketten robuster als für niederschlags- und windgesteuerte Wirkungskaskaden und für raumzeitlich großskalige Phänomene wie Dürren größer als für kleinskalige wie Starkregen oder Tornados. Das Ausmaß der zukünftigen Zunahme fällt stärker aus, je größer der anthropogene Beitrag zum Klimawandel sein wird. Extreme Wetterereignisse sind aber unter allen Szenarien möglich, nur unterschiedlich wahrscheinlich. Ein einführender Artikel dieses Sachstandsberichts erläutert die Grundlagen der verschiedenen Klimaszenarien [7].

Die Wirkungen dieser Ereignisse auf die menschliche Gesundheit werden nachfolgend beschrieben. Grundlage ist dabei eine umfassende Auswertung wissenschaftlicher Literatur, die in Web of Knowledge, PubMed und Scopus recherchiert wurde. Hierbei wurden vor allem systematische Übersichten und Metaanalysen einbezogen. Der Text gibt nicht alle gefundenen Quellen wieder, sondern stellt eine auf die Themenstellung fokussierte Auswahl dar, die nicht den Ansprüchen eines systematischen Reviews genügen kann.

2. Gesundheitliche Folgen ausgewählter Extremwetterereignisse

Im Folgenden wird zunächst die theoretische Perspektive auf Risikokaskaden skizziert. Diese wird anschließend auf die betrachteten Extremwetterereignisse – Überschwemmungen, Stürme, Dürren und Brände – angewendet, um die gesundheitlichen Folgen dieser Ereignisse systematisch darzustellen. Abschließend wird betrachtet, inwiefern vulnerable Gruppen besonders von den Folgen verschiedener Extremwetterereignisse betroffen sind.

2.1 Risikokaskaden – konzeptionelle Grundlagen

Die Internationale Dekade zur Reduzierung von Naturkatastrophen (1990–1999) führte zu einer intensiven konzeptionell-theoretischen Beschäftigung mit Risiken. Als federführende Institution entstand das United Nations

Extremwetterereignisse können durch komplexe Wechselwirkungen mit verstärkenden Faktoren Katastrophen auslösen.

Office for Disaster Risk Reduction; das Hyogo Framework und das Sendai Framework wurden als international verbindliche politische Leitdokumente zur Reduzierung von Risiken im Rahmen der Vereinten Nationen verabschiedet [19]. Parallel dazu entstanden in der wissenschaftlichen Diskussion neue theoretische Zugänge. Katastrophen werden als komplexe Ereignisse konzeptualisiert, bei denen die Exposition von Gruppen und Systemen sowie deren Vulnerabilität analysiert wird [19]. Sie sind demnach nicht das Ergebnis einzelner Ereignisse, sondern entstehen im Zusammenspiel unterschiedlicher Prozesse und Gegebenheiten [20]. Verbundrisiken, die über die Wirkung von Einzelereignissen hinausgehende Katastrophen auslösen können, entstehen, wenn (1) mehrere Extremereignisse gleichzeitig auftreten, (2) sie auf verstärkende Faktoren treffen oder (3) sie durch die ungünstige Kombination mehrerer individuell unkritischer Vorkommnisse ausgelöst werden [20]. Eine besondere Form sind natürliche Ereignisse, die Technikversagen und in Folge dessen Katastrophen auslösen (NaTech-Ereignisse), z. B. die durch einen Tsunami ausgelöste Reaktorkatastrophe in Fukushima.

Zuletzt entstanden Konzepte kaskadierender Risiken, die sich mit den mittelbaren Auswirkungen von Katastrophen befassen. Durch die Vernetzung von Systemen auf lokaler, regionaler und globaler Skala pflanzen sich Störungen fort und können dabei verstärkt werden und ganz neue Risiken hervorrufen [20, 21]. Dieses Konzept basiert auf der Annahme Komplexer Adaptiver Systeme (KAS). Die Komplexität bringt es mit sich, dass Prozesse nicht zwangsläufig linear ablaufen. So entstehen unvorhersehbare Dynamiken, auch weil die Zahl der Verbindungen zwischen Teilsystemen sehr groß ist und Wechselwirkungen kaum vorhersehbar sind. Dadurch können kleine Änderungen sehr große Auswirkungen haben. Wenn Kipppunkte überschritten werden, können KAS neue Gleichgewichtszustände erreichen. KAS sind meist dynamisch und es kommt zu Co-Evolutionen – Entwicklungen einzelner Teilsysteme beeinflussen Entwicklungen anderer [22].

Die KAS-Perspektive bietet einen Rahmen für die Analyse der Umstände, die zu einer Katastrophe führen. Eine darauf basierende Reduzierung von Vulnerabilität durch Anpassungsmaßnahmen kann Katastrophen idealerweise verhindern oder deren Folgen zumindest verringern, ein aktives Katastrophenmanagement die Entstehung kaskadierender Risiken unterbinden oder zumindest einschränken.

Für die gesundheitlichen Folgen von Extremwetterereignissen bedeutet dies, dass nicht allein die unmittelbaren Folgen dieser Ereignisse in den Blick genommen werden dürfen. Eine umfassende Analyse muss auch die mittelbaren und nachgelagerten Folgen systematisch untersuchen.

2.2 Todesfälle, Verletzungen und monetäre Schäden infolge von Extremwetterereignissen

Aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge ist eine vollständige Erfassung der gesundheitlichen Folgen von Extremwetterereignissen nicht möglich. Offizielle Statistiken bilden Todesursachen nach der Internationalen Klassifikation der Krankheiten (International Classification of Diseases, ICD) ab, weitergehende Informationen werden nicht erhoben. Wenn zum Beispiel eine Person von einem Baum erschlagen wird, ist in der Todesursachenstatistik nicht unterscheidbar, ob der Baum aufgrund eines Sturms oder aufgrund eines anderen Auslösers umgefallen

ist. Eine alternative Quelle stellt vor diesem Hintergrund die Datenbank Emergency Events Database (EM-DAT) des Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) dar [23]. Hier werden Daten verschiedener Quellen zu den gesundheitlichen Folgen von Katastrophenereignissen (inkl. der hier betrachteten Extremwetterereignisse) seit dem Jahr 1900 weltweit gesammelt und ausgewertet. Am Stichtag 11.11.2022 enthielt sie für Deutschland 89 Ereignisse, beginnend mit einem Überschwemmungsereignis im Donaugebiet 1920. Insgesamt sind 63 Sturmereignisse mit 718 Todesfällen, 25 Überschwemmungen mit 271 Todesfällen und ein Waldbrand ohne Todesfälle dokumentiert. Hierbei wird in der Datenbank nicht explizit zwischen Stürmen und Sturmfluten differenziert. Der Vorteil der Datenbank EM-DAT ist der weltweite Überblick, jedoch kommen regionale Datenbanken teilweise zu anderen Ergebnissen. Die europäische Umweltagentur verzeichnete zwischen 1980 und 2013 bei 1.500 Ereignissen über 4.700 Todesfälle und Schäden in Höhe von 150 Milliarden Euro [24]. Dabei waren Überschwemmungen die häufigsten Katastrophen auslösenden Ereignisse.

Tabelle 1 zeigt die zehn gravierendsten Ereignisse in Deutschland, basierend auf der in der EM-DAT hinterlegten Anzahl der registrierten, unmittelbar geschädigten Personen (Todesfälle und verletzte Personen). Für das Starkregenereignis, das Mitte Juli 2021 zu großflächigen Überschwemmungen vor allem in Rheinland-Pfalz (RP) und Nordrhein-Westfalen (NW) führte, wurden die meisten Verletzten registriert und das Ereignis forderte mit 197 Todesfällen die zweitmeisten Todesopfer in Deutschland. Die meisten Todesfälle traten infolge der Sturmflut von 1962 auf (347).

Im weltweiten Vergleich ist die Exposition Deutschlands gegenüber Schadensereignissen relativ gering und das Risikoprofil unterscheidet sich, sodass hier einige global relevante Ereignistypen bisher keine Katastrophen ausgelöst haben. Global wurden in der EM-DAT Datenbank 25.722 Schadensereignisse mit 38,4 Millionen Toten und 10,8 Millionen Verletzten erfasst. Die fünf Schadensereignisse, die in den letzten 122 Jahren global die meisten Todesfälle verursacht haben, sind (1) Dürren, (2) Epidemien und Pandemien, wobei die COVID-19-Pandemie (noch) nicht in der Datenbank erfasst wird, (3) Überschwemmungen und Überflutungen, (4) NaTech-Ereignisse und (5) Erdbeben. Gleichzeitig ist ab den 1930er-Jahren ein Rückgang der Todesfallzahlen zu beobachten (Abbildung 1). In Anbetracht der wachsenden Weltbevölkerung und der steigenden Zahl der Schadensereignisse bedeutet dies ein sinkendes individuelles Sterberisiko, was mit einem effektiveren Risikomanagement und verbesserter internationaler Zusammenarbeit zusammenhängt.

Für die im Folgenden betrachteten Extremwetterereignisse weist die Datenbank weltweit 12.341 Schadensereignisse mit 20,2 Millionen Todesfällen auf (Abbildung 2). Die größten Einzelereignisse sind dabei Hungerkatastrophen, die mit Überschwemmungen oder Dürren als auslösenden Ereignissen erklärt werden. Dies stellt eine Komplexitätsreduktion dar, die Wirkungszusammenhänge verdeckt. Die Hungersnot in Bengalen 1943 beispielsweise wird hier primär als Dürre erfasst, wobei Sen [25] zeigte, dass es in Bengalen nicht zu wenige Nahrungsmittel gab, sondern die arme Bevölkerung keinen Zugang zu diesen hatte. In Deutschland sind Stürme und Überschwemmungen die häufigsten Extremwetterereignisse

Tabelle 1
Zusammenstellung der zehn gravierendsten Schadensereignisse in Deutschland (unmittelbare gesundheitliche Folgen), nach der erfassten Zahl Betroffener sortiert
Quelle: Eigene Darstellung nach EM-DAT [23]

Jahr	Ereignis	Region/Ort	Registrierte Todesfälle	Registrierte verletzte Personen	Erfasste Zahl Betroffener	Schäden[1]	Versicherte Schäden[1]	Bemerkung
2021	Überschwemmung	BW, BY, HE, NW, RP, SN, ST, TH	197	1.000	1.197	40,0	9,7	
1962	Sturm	HH, Nordsee	347	Keine Angabe	347	5,4	Keine Angabe	Sturmflut
1984	Sturm	München	3	250	253	2,5	1,3	Hagelsturm
2006	Sturm	BW, BY, HE	10	200	210	Keine Angabe	Keine Angabe	
2007	Sturm	BB, BE, BW, BY, HB, HE, HH, MV, NI, NW, RP, SH, SL, SN, ST, TH	11	130	141	7,2	4,1	Orkan (Kyrill)
2002	Überschwemmung	BB, BW, BY, NI, SN, ST, TH	27	108	135	17,5	2,7	
2006	Sturm	BW	1	100	101	Keine Angabe	Keine Angabe	Hagel
1972	Sturm	NI, DDR	54	Keine Angabe	54	2,7	Keine Angabe	Orkan (Quimburga)
2020	Sturm	Frankfurt, Kiel, Köln, Paderborn, Saarbrücken	0	33	33	Keine Angabe	Keine Angabe	Orkan (Sabine)
2017	Sturm	Altötting, Freyung-Grafenau, Passau	3	24	27	0,2	Keine Angabe	Hagel

[1] in Mrd. US Dollar, Preise von 2020
BB = Brandenburg, BE = Berlin, BW = Baden-Württemberg, BY = Bayern, DDR = Deutsche Demokratische Republik, HB = Bremen, HE = Hessen, HH = Hamburg, Mrd. = Milliarden, MV = Mecklenburg-Vorpommern, NI = Niedersachsen, NW = Nordrhein-Westfalen, RP = Rheinland-Pfalz, SH = Schleswig-Holstein, SL = Saarland, SN = Sachsen, ST = Sachsen-Anhalt, TH = Thüringen

mit den höchsten Zahlen an Betroffenen und Todesfällen (Abbildung 2).

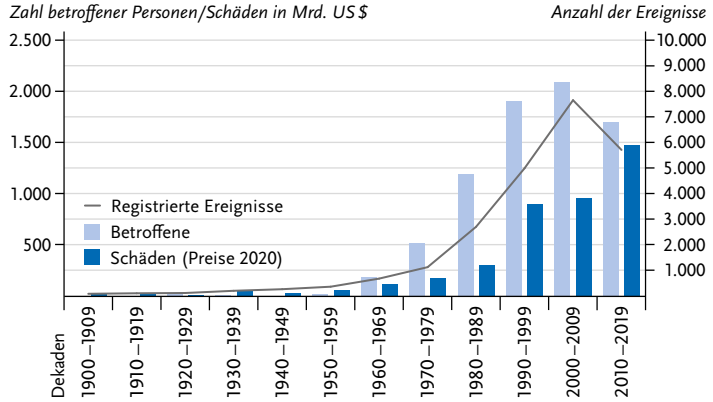
In Bezug auf Extremwetterereignisse sind global gegenläufige Trends festzustellen: Die Zahl der Ereignisse, der Betroffenen und der Schäden steigt, während die Zahl der Todesfälle sinkt (Abbildung 1) [26]. Für Deutschland sind diese Trends nicht gleichermaßen eindeutig. Durch die Überschwemmungen im Juli 2021 wurden bereits jetzt in der laufenden Dekade mehr Todesfälle verzeichnet als in den vorangegangenen fünf Dekaden. Die höchsten versicherten Schäden wurden in Deutschland für die Dekade 2000–2009 registriert.

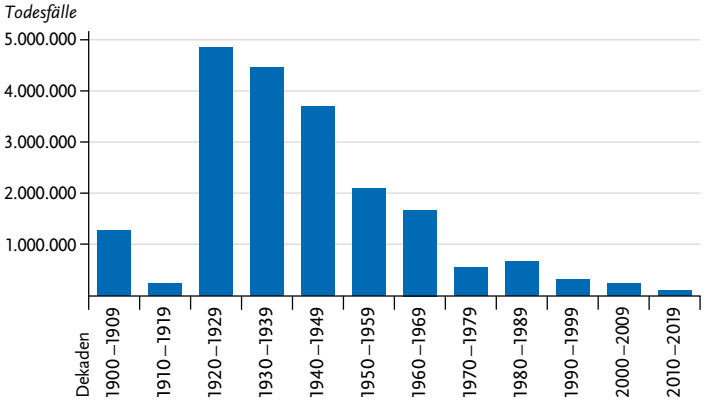


Abbildung 1
Globale Trends dokumentierter Schadensereignisse (hier betrachtete Ereignistypen) seit 1900
Quelle: Eigene Darstellung nach EM-DAT [23]

Abbildung 1a (links)
Betroffene Personen und monetäre Schäden

Abbildung 1b (rechts)
Todesfälle





2.3 Risikokaskaden infolge von Überschwemmungen, Starkregen und Sturmfluten

Überschwemmungen können durch verschiedene Phänomene ausgelöst werden. Sturmfluten können in Deutschland auftreten, wenn starke Winde aus nördlichen/nordwestlichen Richtungen Wasser an die Küsten drücken (Nord- und Ostsee) und diese Situation mit dem Tidehochwasser zusammentrifft (v. a. Nordsee). Flusshochwasser treten als Folge langanhaltender und großflächiger Niederschläge und ggf. mit Schneeschmelzen in den Flusseinzugsgebieten auf. Sturzfluten sind das Ergebnis lokaler Starkniederschläge mit hohen Magnituden, oft auf der Zeitskala von Stunden und in Verbindung mit einer ausgeprägten Reliefierung des Geländes (z. B. enge Täler, große Höhenunterschiede auf kleinem Raum). Die aktuelle Kenntnislage deutet darauf hin, dass alle drei Ereignistypen (Sturmfluten, Flusshochwasser und Sturzfluten) in Zukunft an Frequenz und Magnitude zunehmen könnten (Infobox, [6]). Bis Ende 2100 könnten in Europa jährlich 3,7 Millionen Menschen von Küstenüberschwemmungen betroffen sein [27].

Diese Ereignisse können zu großen Schäden führen, wenn sie auf vulnerable Gruppen oder Strukturen treffen. Neben Magnitude und Dauer der Ereignisse sind u. a. lokale hydrodynamische Gegebenheiten wie Fließquerschnitte oder Bebauung im Gerinne ausschlaggebend [28]. Das Vorhandensein von Risikomanagementmaßnahmen [27] und von Gefahrenquellen (z. B. Industrieanlagen, Deponien, Kläranlagen, Tankstellen [29, 30]) in den potenziellen Überschwemmungsgebieten entscheidet darüber, ob Extremereignisse zu Schäden führen.

Unmittelbar durch das Ereignis hervorgerufene Gesundheitsfolgen können Todesfälle aufgrund von Ertrinken sein, auch durch Einschluss in Gebäuden und Fahrzeugen, sowie (tödliche) Verletzungen. Infolge großflächiger Beschädigungen bzw. Überschwemmungen können weitere Todesfälle und weitere physische Gesundheitsfolgen, z. B. durch Herzinfarkte, Stromschläge, Brände, Benzin- und Gasaustritte (v. a. CO, CO_2) aufgrund technischer Defekte und einstürzen-

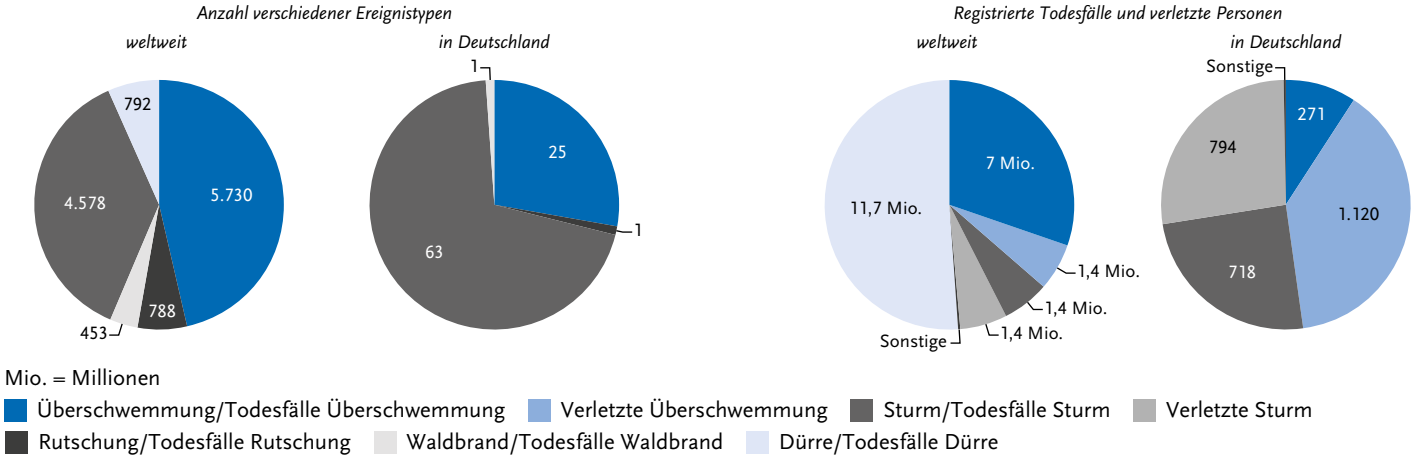
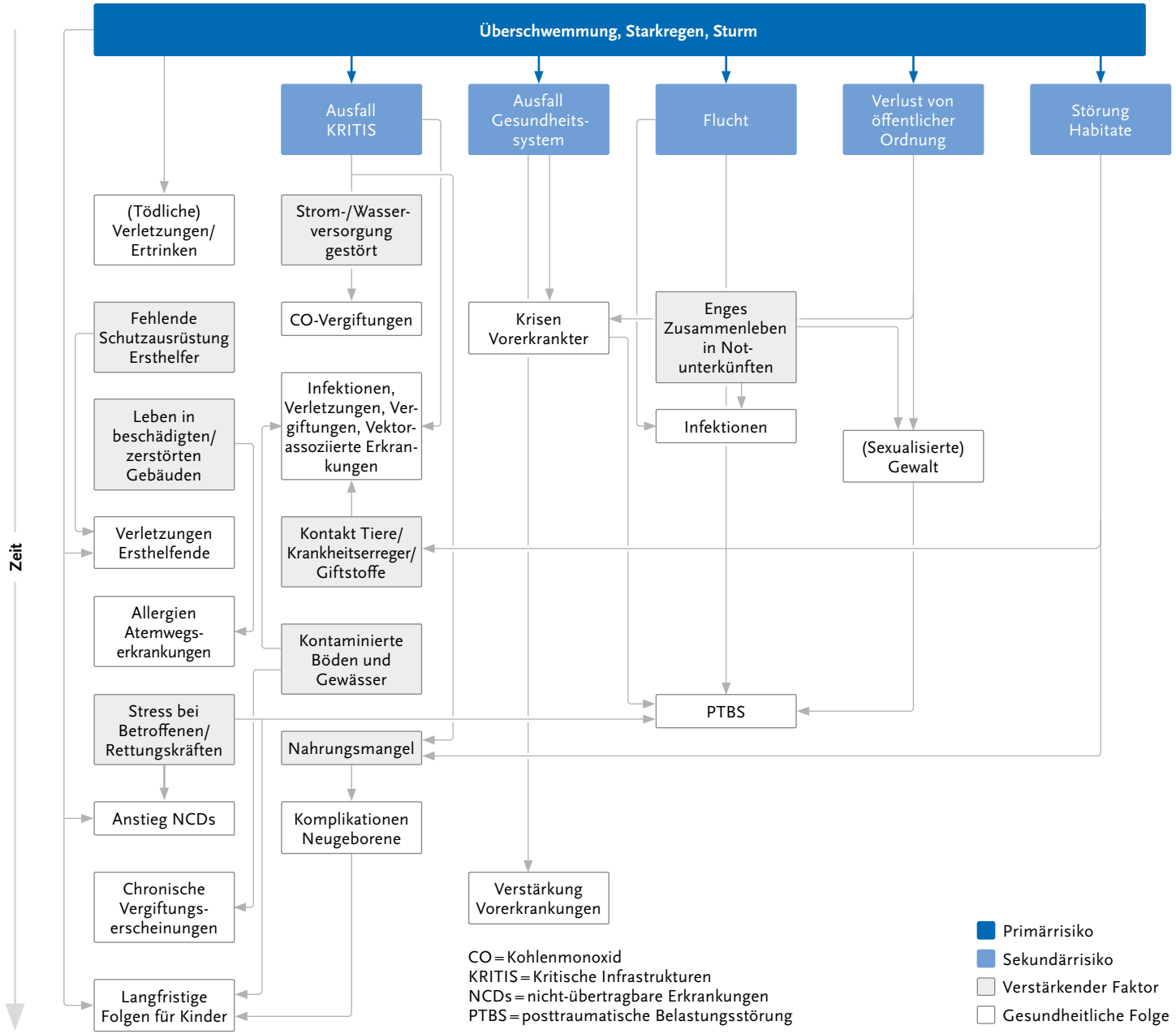


Abbildung 2
Personenschäden durch verschiedene Ereignistypen. Anzahl verschiedener Ereignistypen weltweit bzw. in Deutschland und registrierte Todesfälle und verletzte Personen durch verschiedene Ereignistypen weltweit bzw. in Deutschland.
Quelle: Eigene Darstellung nach EM-DAT [23]

der Bauteile, zu verzeichnen sein [28, 31, 32] (vgl. Abbildung 3, diese zeigt auch die Risikokaskaden des Abschnitts 2.4 Risikokaskaden infolge von Stürmen).

Mittelbar kann die Störung Kritischer Infrastrukturen (KRITIS, u. a. Energieversorgung, Wasserver- und -entsorgung, Transport und Verkehr, Einrichtungen des Gesundheitssystems) zu Engpässen bei der medizinischen Versorgung (wie durch Ausfall geplanter Behandlungen, Medikamentenmangel) und zu Verzögerungen in der Erstversorgung (z. B. Wasser, Lebensmittel, Notunterkünfte) führen [27, 31–33]. In der Literatur wird zudem ein Anstieg von Herz-Kreislauf-Beschwerden nach Überschwemmungsereignissen beschrieben [31, 34, 35]. Jedoch ist nicht dokumentiert, ob dieser auf den psychischen Stress in der Ereignissituation oder auf den Ausfall medizinischer Grundversorgung zurückzuführen ist. Weitere mittelbare Gesundheitsfolgen durch erhöhte Exposition gegenüber Hitze, Kälte oder feuchten Räumen aufgrund inadäquater Unterkünfte werden bisher nicht systematisch erfasst. Dabei kann es durch Schimmelpilzentwicklung in hochwasserbeschädigten Gebäuden zu Atemwegserkrankungen kommen [30, 36]. Schäden an Trink- und Abwasserinfrastruktur, sowie der Ausfall der Kühlschränke durch Stromausfälle können zu vermehrtem Auftreten lebensmittelbedingter Infektionen führen, deren Zusammenhang mit dem Klimawandel von Dietrich et al. [37] näher betrachtet wird. Vektor-assoziierte Krankheiten können nach Überschwemmungen zunehmen, wenn z. B. Nagetiere in Innenräumen Schutz suchen [38, 39]. Ein weiterer Beitrag dieses Sachstandsberichts widmet sich detailliert Vektor- und Nagetier-assoziierten Krankheiten infolge des Klimawandels [40]. Zudem kann der Verlust landwirtschaftlicher Flächen durch Überschwemmungen und Erosion die regionale Nahrungsmittelproduktion gefährden und die Verunreinigung durch Salzwasserintrusionen aufgrund von Sturmfluten kann die Trinkwassergewinnung beeinträchtigen [41].

Abbildung 3
Risikokaskaden, die durch Überschwemmungen, Starkregen und Stürme ausgelöst werden können. Pfeile kennzeichnen mögliche kausale Zusammenhänge zwischen Risiken, verstärkenden Faktoren und gesundheitlichen Folgen.
Quelle: Eigene Darstellung



Für die detaillierte Analyse von Risikokaskaden fehlt bisher die notwendige Datenbasis.

Starkregen und Überschwemmungen können über Oberflächenabfluss, Mischwasserabschläge [42–44] und die Zerstörung der Abwasserinfrastruktur zum Eintrag von Schadstoffen und Keimen in Gewässer führen [41, 45]. Zudem können Schadstoffe, u. a. persistente organische Spurenstoffe (persistent organic pollutants, POPs), Schwermetalle, Pestizide, Radionuklide und Keime aus Sedimenten und belasteten Böden mobilisiert werden [29, 45]. Der Kontakt zu verunreinigtem Wasser birgt ein erhöhtes Risiko für Infektionen [29, 32], z. B. durch die Aufnahme von antibiotikaresistenten Bakterien [46]. In Halle (Saale) wurde 2013 nach einem Hochwasserereignis eine erhöhte Infektionszahl mit dem Parasit *Cryptosporidium hominis* bei Kindern festgestellt, die sich nach der Flut in Auen und Überschwemmungswiesen aufhielten [47].

Mittelfristige gesundheitliche Schäden können durch die Schadstoffexposition über die Luft, z. B. in kontaminierten Gebäuden, über Wasser und über die Nahrungsaufnahme hervorgerufen werden. Letztere sind eine Folge der Anreicherung von Schwermetallen und POPs z. B. in Ackerböden und Fischen [28, 29]. Unmittelbar dokumentierte Auswirkungen nach Überschwemmungen wie Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit, Atemwegs- und Hautreizungen konnten bisher jedoch nicht eindeutig einer erfassten erhöhten Exposition gegenüber halogenierten Pestiziden (d. h. organische Verbindungen, bei denen mindestens ein Wasserstoffatom durch Chlor, Fluor, Brom oder Iod ersetzt wurde), flüchtigen organischen Verbindungen oder Schwermetallen nach Überschwemmungsereignissen zugewiesen werden [45]. Problematisch ist bei der Abschätzung der Folgen die geringe Datenlage, v. a. hinsichtlich der Exposition vor und nach dem Ereignis und der zeitgleichen Erfassung von Symptomen. Neben den akuten gesundheitlichen Folgen ereignisbezogener Chemikalienexposition ist der Rückbezug der potenziellen chronischen Auswirkungen, die sich erst mehrere Monate nach dem Ereignis bemerkbar machen, besonders herausfordernd [45]. Dabei stehen viele anorganische und organische Schadstoffe im Verdacht kanzerogene, kardiovaskuläre, neuro-, leber-, immuno- oder reproduktionstoxische Auswirkungen hervorzurufen [29, 48]. Aufgrund der Vielzahl der Schadstoffe bestehen hier jedoch noch einige Forschungsdefizite.

Eine bedeutende Folge von Überschwemmungsereignissen ist die Beeinträchtigung der psychischen Gesundheit [49, 50]. Für Europa wurde ein Anstieg an posttraumatischen Belastungsstörungen (PTBS), Angststörungen und Depressionen bis hin zu Suiziden im Vergleich zu der Zeit vor einem Ereignis benannt [32, 50]. Diese Auswirkungen sind auch lange nach dem Ereignis zu beobachten [50]. Neben dem direkten traumatischen Erleben des Ereignisses sind die psychischen Gesundheitsfolgen auch auf materielle Verluste und den teils langwierigen Wiederaufbau zurückzuführen [51]. In einer Studie zu den Folgen der Hochwasser an Elbe und Donau 2013 korrelierte der Erfolg der Erholung negativ mit der Dauer bis zum Beginn des Erhalts von Kompensationszahlungen, der gesundheitlichen Konstitution, dem Finanzstatus und der Verpflichtung durch Eigentum. Angst und Sorge aufgrund eines (subjektiv wahrgenommenen) unzureichenden Hochwasserschutzes und den damit verbundenen Konsequenzen zukünftiger Ereignisse stellten ebenfalls negative Einflussfaktoren auf die Erholung dar [51].

In den letzten 20 Jahren wurden in Deutschland zwölf Flutereignisse in der EM-DAT Datenbank registriert [23].

Besonders verheerend waren die Flutkatastrophe in Westdeutschland im Juli 2021, sowie die Elbe-Hochwasser 2002 und 2013.

An der deutschen Nord- und Ostseeküste kommt es, vor allem im Winterhalbjahr, regelmäßig zu Sturmfluten. An der Nordsee gab es seit 1967 64 schwere Sturmfluten (> 2,50 m über mittlerem Hochwasser, MHW), davon 13 sehr schwere Sturmfluten (> 3,50 m ü. MHW) [52]. Jedoch wurde vielerorts ein wirkungsvoller Küstenschutz aufgebaut. Vor allem die Erfahrung der Sturmflut im Februar 1962 („Hamburger Sturmflut") führte zu vermehrten Küstenschutzmaßnahmen in Deutschland [53], sodass die Schäden und gesundheitlichen Folgen nachfolgender, extremerer Ereignisse (z. B. 1976, 1990, 1994 und 2013 an der Nordsee sowie 1995 und 2006 an der Ostsee) stark reduziert wurden [53].

2.4 Risikokaskaden infolge von Stürmen

Großflächige Sturmereignisse treten in Deutschland auf, wenn große Tiefdruckwirbel – Zyklone – vom Atlantik kommend über Mitteleuropa ziehen. Sie können Winde von bis zu 200 km/h auslösen [54]. Zu den schwersten beobachteten Ereignissen der letzten Dekaden gehören die Orkane Lothar (1999), Jeanett (2002), Kyrill (2007) und Zeynep (2022). In der Datenbank EM-DAT sind für Deutschland seit 1900 insgesamt 63 Sturmereignisse dokumentiert, davon entfallen 33 auf die Jahre seit 2000 [23]. Die größten Schäden löste in den letzten beiden Dekaden 2007 das Sturmtief Kyrill aus. Aus den Vergangenheitsdaten lässt sich kein eindeutiger Trend hinsichtlich der Entwicklung von Sturmereignissen feststellen. Wenngleich keine gesicherten Aussagen getätigt werden können, muss zukünftig mit einer Zunahme der Frequenz und Magnitude von Sturmereignissen gerechnet werden [54, 55]. Neben großflächigen Sturmereignissen treten in Deutschland zudem jährlich ca. 20–60 Tornados auf, die kleinräumig starke Schäden verursachen können [56].

Im globalen Vergleich ist Deutschland weniger von starken Sturmereignissen betroffen als Länder in den Tropen und Subtropen, in denen tropische Wirbelstürme regelmäßig mit hohen Windgeschwindigkeiten und Niederschlägen schwere Schäden auslösen. Dies spiegelt sich auch in der Literatur zu den gesundheitlichen Folgen von Stürmen wider. Insgesamt wurden 22 Review-Artikel zu gesundheitlichen Folgen von Stürmen identifiziert, von denen 14 zugänglich waren und für diesen Abschnitt ausgewertet wurden. Dabei wird deutlich, dass es in Bezug auf das Wissen über die gesundheitlichen Folgen von Extremwetter global sehr große Unterschiede gibt [34, 57]. Das Sturmereignis, dessen Folgen am eingehendsten analysiert wurden, ist der Hurricane Katrina (2005, Südosten der USA).

Die gesundheitlichen Folgen von Stürmen lassen sich in mittelbare und unmittelbare Folgen auf unterschiedlichen Ebenen gruppieren (Abbildung 3). Zu den unmittelbaren gesundheitlichen Folgen von Stürmen gehören Verletzungen, für die in zahlreichen Studien umfassende Daten vorliegen [34, 58]. Verletzungen treten aber auch mittelbar auf, wenn Rettungskräfte bei Aufräumarbeiten zu Schaden kommen, bei denen sie auch Vergiftungen erleiden können [58, 59]. Der Stress, dem Sturmopfer während des Ereignisses ausgesetzt sind, aber auch die durch das Ereignis ausgelöste Veränderung der Lebensumstände

(z. B. Obdach-, Arbeitslosigkeit) manifestieren sich mittelfristig in einem Anstieg nicht-übertragbarer Erkrankungen (non-communicable diseases, NCDs) [60]. Die Stresserfahrung führt auch zu langfristig beobachtbaren Entwicklungsverzögerungen bei Kindern, deren Mütter während der Schwangerschaft ein schweres Sturmereignis erlebt haben. Diese manifestieren sich allerdings auch unmittelbar durch nachgeburtliche Komplikationen und werden – vor allem im Entwicklungskontext – auch durch zeitweise erschwerten Zugang zu Nahrungsmitteln verstärkt [61–63].

Mittelbar ruft der Ausfall Kritischer Infrastruktur negative gesundheitliche Folgen hervor, z. B. einen Anstieg von Kohlenmonoxidvergiftungen, wenn während Stromausfällen mit Holz, Kohle oder Gas in Innenräumen gekocht wird [34, 58, 64]. Ausfälle von Wasserver- und -entsorgung können Infektionen begünstigen, häufig nimmt der ungeschützte Kontakt zu Tieren zu, deren Fäkalien Pathogene übertragen können, die Menschen aber auch durch Bisswunden verletzen können [34, 65]. Da häufig auch Einrichtungen des Gesundheitssystems während Sturmereignissen nicht zugänglich sind, können für Vorerkrankte kritische Situationen entstehen, zum Beispiel Patientinnen und Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (chronic obstructive pulmonary disease, COPD), die auf eine dauerhafte Sauerstoffversorgung angewiesen sind, oder dialysepflichtige Personen [60, 64]. Die akute Unterversorgung chronisch Erkrankter manifestiert sich auch in einer beobachteten dauerhaften Verschlechterung des Gesundheitszustandes [34, 60].

Schwere Sturmereignisse, wie z. B. Tropenstürme, zwingen Menschen zur Flucht. Das Zusammenleben in beengten Notunterkünften kann der Verbreitung von Infektionskrankheiten Vorschub leisten [62]. Die Flucht, aber auch andere traumatische Ereignisse während des Sturmes können langfristige Folgen für die psychische Gesundheit, etwa PTBS, nach sich ziehen [62, 64, 66].

Der Verlust der öffentlichen Ordnung wirkt sich vor allem auf vulnerable Gruppen aus, neben Kindern und älteren Menschen [67] sind häufig Frauen besonderen Gefahren ausgesetzt (vgl. auch Abschnitt 2.6 Vulnerable Gruppen und Betroffenheit). In der Literatur finden sich auch Hinweise darauf, dass Frauen sexualisierte Gewalt erfahren, was weitere Belastungen nach sich zieht [61].

2.5 Risikokaskaden infolge von Dürren und Bränden

Bei Dürren wird nach Ursache und Folge zwischen drei unterschiedlichen Typen unterschieden:

(1) Meteorologische Dürre herrscht, wenn Niederschlagsarmut und hohe Temperaturen zusammentreffen. Aufgrund einer hohen potenziellen Verdunstung ergibt sich eine negative klimatische Wasserbilanz (typischer Indikator).

(2) Agrarische Dürre beschreibt den Trockenstress von landwirtschaftlichen Anbauprodukten aufgrund von Wassermangel im durchwurzelten Boden. Dieser stellt sich in unseren Breiten erst nach mehrwöchigen Trockenphasen ein. In Extremfällen kann es zu Ertragseinbußen oder gar Ernteausfällen kommen.

(3) Hydrologische Dürre wird anhand von Pegeldaten erfasst und ist das Ergebnis eines angespannten Landschaftswasserhaushalts. Auch hier sind lange und großräumige Trockenperioden ausschlaggebend.

Abgesehen von den unmittelbaren Wirkungen niedriger Wasserstände und Wasservolumina, z. B. auf die Trinkwas-

serverfügbarkeit, ergeben sich Auswirkungen auf die Wasserqualität und die Gefahr von Bränden. Zukunftsprojektionen zeigen, dass Dürren in Mitteleuropa im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts an Frequenz, Magnitude und Dauer zunehmen könnten [6]. Niederschlagsarmut, hohe Temperaturen und vielfältige Nutzungsansprüche könnten insbesondere im Sommer und den Übergangsjahreszeiten zu zunehmendem Wasserstress führen.

Risikokaskaden infolge von Dürren können unterschiedliche gesundheitliche Folgen hervorrufen (Abbildung 4). In extremen Fällen führen sie zu Unter- bzw. Mangelernährung mit erhöhter Sterblichkeit bei vulnerablen Gruppen. Dies wird vor allem im Globalen Süden beobachtet [68]. Im Globalen Norden stellt die Versorgung mit Lebensmitteln und Trinkwasser derzeit eine geringe Gefahr dar und die ökonomischen Folgen dominieren.

Meist gehen Dürren mit einer stabilen Wetterlage und damit einem verringerten Austausch von Luftmassen einher. Dadurch kommt es zu einer Anreicherung von Schadstoffen in der Atmosphäre und damit einer Verschlechterung der Luftqualität mit entsprechenden Folgen für die Gesundheit [69]. Im Rahmen dieses Sachstandsberichts werden die gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen von Breitner-Busch et al. [70] näher betrachtet.

Den zunehmenden agrarischen Dürren, oft verbunden mit Hitzeperioden und starker Sonneneinstrahlung, sind die in der Landwirtschaft tätigen Personen besonders ausgesetzt, weshalb mögliche Gesundheitsgefährdungen wie Hitzschlag, Herz-Kreislauf-Versagen und Hautkrebs diese Personengruppe besonders betreffen [4, 71]. Die betriebswirtschaftlichen Unsicherheiten durch Dürren können auch die psychische Gesundheit von Personen, die in der Land- und Forstwirtschaft arbeiten, beeinträchtigen und das Suizidrisiko erhöhen [72–75] (s. auch den Scoping Review von Gebhardt et al. [76] zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit im Rahmen dieses Sachstandsberichts).

Niedrigwasser kann sich nachteilig auf die Wasserqualität auswirken. Durch das verringerte Wasservolumen und die höheren Verweilzeiten des Wassers erwärmt sich dieses stärker und Keime und Schadstoffe werden weniger verdünnt [77]. Hohe Wassertemperaturen und geringere Fließgeschwindigkeiten während sommerlicher Niedrigwasser werden mit dem Massenaufkommen von potenziell toxischem Phytoplankton (Algenblüte) in Verbindung gebracht, siehe hierzu auch einen Artikel zu wasserbürtigen Infektionen und Intoxikationen in diesem Sachstandsbericht [78]. Der direkte Kontakt mit kontaminiertem Wasser erfolgt durch berufliche Tätigkeiten im und am Wasser oder Freizeitaktivitäten, z. B. Wassersport. Für die Trinkwasserversorgung in Deutschland ist die verringerte Wasserqualität nur in speziellen Fällen ein potenzielles Risiko. Eine mögliche Zunahme von Leitwertüberschreitungen kann ressourcenaufwändigere Verfahren der Trinkwasseraufbereitung erfordern. Dies kann sich z. B. bei Uferfiltraten ergeben, wenn angereicherte Schadstoffe oder Toxine nicht ausreichend aus dem Wasser filtriert werden. In Trinkwassertalsperren können toxinbildende Cyanobakterienblüten die Aufbereitung des Wassers erschweren. Ein Kontakt mit dem verunreinigten Wasser kann zu gastrointestinalen Infektionen und Erkrankungen sowie zu zoonotischen und Vektor-assoziierten Krankheiten führen [69, 78]. Für den Kontakt mit Cyanotoxinen wurden zusätzlich Hautirritationen und respira-

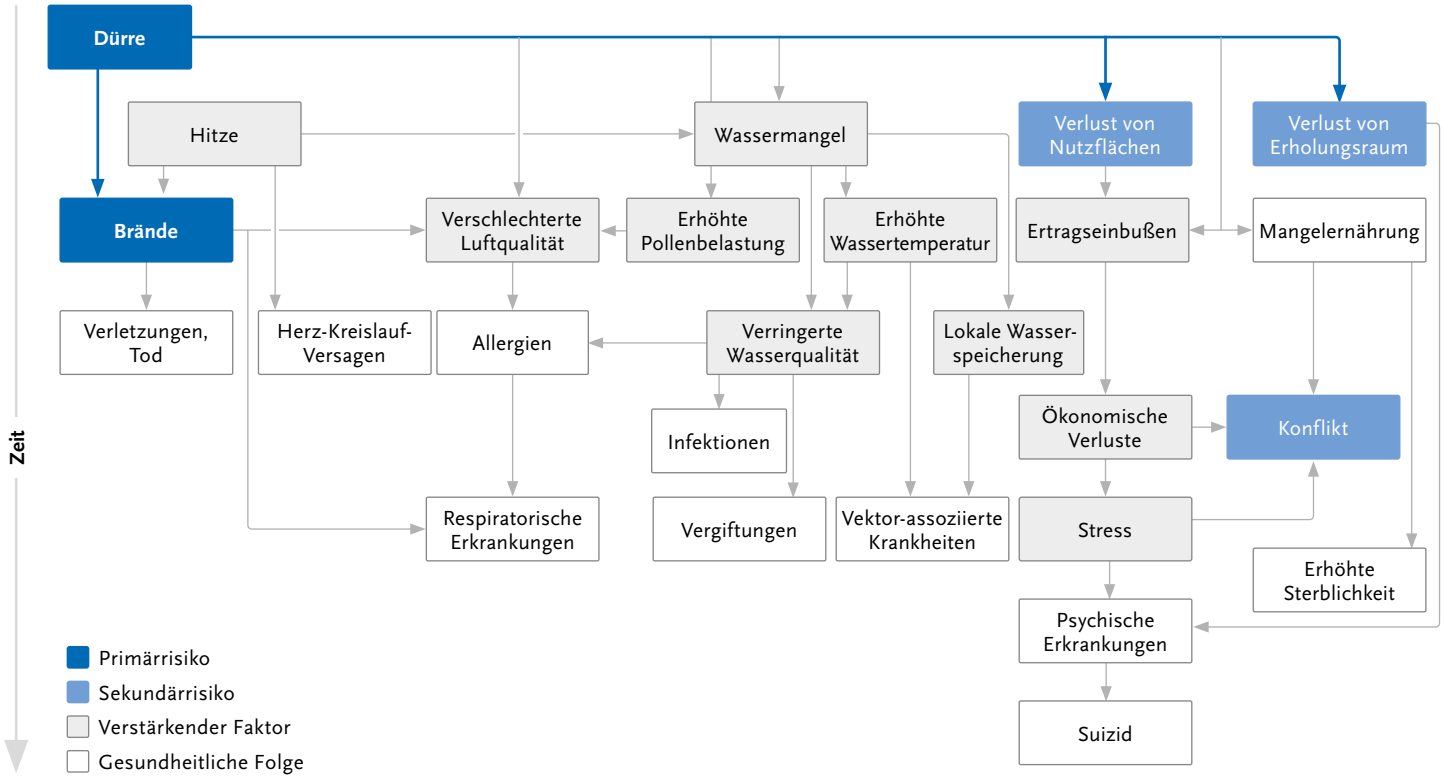


Abbildung 4
Risikokaskaden, die durch Dürre und Brände ausgelöst werden können. Pfeile kennzeichnen mögliche kausale Zusammenhänge zwischen Risiken, verstärkenden Faktoren und gesundheitlichen Folgen.
Quelle: Eigene Darstellung

torische Erkrankungen berichtet, diese sind aber oft nicht eindeutig auf Cyanobakterienexposition zurückzuführen [79].

Mittelbar können Dürren zukünftig zu einer Ausbreitung von Vektor-assoziierten Krankheiten führen, wenn z. B. in Abwesenheit von Prädatoren (Raubtieren) eine starke Vermehrung von Stechmücken in Wasserlachen oder in Gefäßen zur Wasserspeicherung stattfindet [40, 80].

Dürren können auch als Teil von Verbundrisiken gesundheitliche Folgen auslösen, z. B. wenn Starkregenereignisse während einer Dürrephase auftreten. Einerseits ist die Infiltration trockener Böden gehemmt, sodass es zu einem erhöhten oberflächlichen Direktabfluss und zu einer Erhöhung von Sturzflutgefahren und damit verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen kommen kann (Abschnitt 2.3 Risikokaskaden infolge von Überschwemmungen, Starkregen und Sturmfluten). Andererseits kann es durch Eintrag von Schadstoffen oder Keimen zu einer Verschlechterung der Wasserqualität kommen.

Sommerliche Dürren gehen häufig mit Hitzewellen einher. Dadurch sind wesentliche Rahmenbedingungen für das Entstehen von Bränden gegeben, die durch geringe Einflüsse ausgelöst werden können (z. B. durch Blitze oder unachtsames Verhalten der Bevölkerung), wodurch das Waldbrandrisiko steigt [81, 82]. Neben den klimatischen Veränderungen spielen auch andere Faktoren wie die Baumartenzusammensetzung (z. B. ein hoher Anteil an Nadelbäumen) eine Rolle [6]. Wald- und Buschbrände gefährden die physische Gesundheit von Betroffenen und Rettungskräften unmittelbar durch Verbrennungen, durch die Rauchentwicklung und die damit verbunden Folgen für die Atemwege, aber auch durch Auswirkungen auf die psychische Gesundheit oder mittelbar durch die Beeinträchtigung der physischen Infrastruktur [83–85].

Nach dem extrem trockenen Jahr 1959 weisen vor allem die Jahre 2003, 2018, 2019, 2022 ein hohes Niederschlagsdefizit und Dürreperioden auf, wobei weitere regional wirksame Dürreereignisse hinzukommen [12, 14, 86]. Die mehrjährige Dürre von 2018–2020 stellt die gravierendste Dürre in Europa der letzten 250 Jahre dar [87].

In der EM-DAT Datenbank ist für Deutschland kein Dürreereignis gelistet [23] und in der jüngeren Vergangenheit gab es in Deutschland keine in der Literatur belegten unmittelbaren gesundheitlichen Auswirkungen einer Dürre. Die hydrologischen Dürren der letzten Jahre führten aber zu ausgeprägten Niedrigwassersituationen mit zu beobachtenden Verschlechterungen der Wasserqualität, z. B. durch massive Phytoplanktonblüten wie sie seit 2017 wiederkehrend an der Mosel und 2022 an der Oder zu beobachten waren.

Im Zeitraum zwischen 1991 und 2021 sind die Jahre 1991, 1992 und 2003 die mit der größten Anzahl an Waldbränden [88]. Bezogen auf die Fläche hat mit 4.900 Hektar in 1992 mit Abstand die meiste Fläche gebrannt, gefolgt von 2019 mit 2.700 Hektar und 2018 mit 2.300 Hektar [88]. Das Europäische Waldbrandinformationssystem (European Forest Fire Information System, EFFIS) geht für 2018 sogar von 3.600 Hektar aus und für 2022 von 4.300 Hektar [89]. In den besonders durch steigende Temperaturen und Dürren betroffenen Regionen im Osten Deutschlands und im Oberrheingebiet sind bis zur Mitte des Jahrhunderts im Mittel mehr als 40 Tage mit einer hohen oder sehr hohen Waldbrandgefahr möglich [6].

2.6 Vulnerable Gruppen und Betroffenheit

Die Betroffenheit durch Extremwetterereignisse unterscheidet sich regional und für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen. Die naturräumliche Ausstattung ist häufig die Vorbedingung für das Auftreten einzelner Ereignistypen. Sturmfluten sind ein Phänomen der Küsten- und Ästuarregionen (Mündungsbereiche großer Flüsse ins Meer). Hier treten auch besonders starke Winde auf, ebenso wie in exponierten Gebirgslagen des Binnenlandes. Sturmschäden können aber auch kleinräumig dort auftreten, wo die Anfälligkeit erhöht ist (z. B. Wälder, Städte, vulnerable Verkehrsinfrastrukturen – etwa Bahn-Oberleitungen). Flusshochwasser betreffen Gebiete entlang der Fließgewässer, Sturzfluten entfalten in stark reliefierten Gebieten besonderes Schadenspotenzial – extreme Starkregenereignisse aber können jeden Ort in Deutschland treffen.

Ein erhöhtes Risiko für Dürren und ihre potenziellen Folgen ist nicht direkt verortbar, aber es ergeben sich, je nach Dürretyp (agrarisch, hydrologisch), unterschiedliche Betroffenheiten. In Regionen und Jahreszeiten mit einem ohnehin angespannten Wasserhaushalt sind die Folgen deutlicher (z. B. Ostdeutschland) als in Regionen mit gewissen Reserven im System (z. B. Rheinland).

Vier Bevölkerungsgruppen sind aus unterschiedlichen Gründen besonders von den gesundheitlichen Folgen von Extremwetterereignissen betroffen:

(1) Kinder, ältere Menschen und Menschen mit körperlichen Einschränkungen – sie können sich evtl. nicht (mehr) selbstständig versorgen oder in Sicherheit bringen und die auftretenden körperlichen Belastungen können sie an ihre Grenzen bringen;

(2) Menschen mit geringem sozioökonomischen Status – sie sind Extremwetterereignissen häufiger unmittelbar ausgesetzt und haben oft geringere Bewältigungskapazitäten;

(3) Männer sind häufiger von den unmittelbaren Folgen betroffen (u. a. höhere Risikobereitschaft);

(4) für Frauen können spezifische Langzeitfolgen auftreten (z. B. Schwangerschaftskomplikationen).

Exemplarisch verdeutlichen die Opferzahlen der Überschwemmungen in Westdeutschland und Belgien im Juli 2021 diese sich überschneidenden Vulnerabilitäten: Unter den unmittelbaren Todesfällen (184) in RP und NW waren 138 Personen (75 %) älter als 60 Jahre (Bevölkerungsanteil in NW: 27 %) sowie 3 (1,6 %) Kinder unter 14 Jahren (Bevölkerungsanteil in NW: 13 %) [32, 90]. Das Verhältnis von Männern (65) und Frauen (70) unter den Todesopfern war in RP ausgeglichen, in NW starben etwa doppelt so viele Männer (31) wie Frauen (18) [32]. Dies ist konsistent mit Quellen, die nahelegen, dass Männer seltener Schutzmaßnahmen ergreifen, z. B. Evakuierungen [91]. Das Geschlechterverhältnis in RP entspricht den Mustern bei Sturmfluten (1953, 1962). Das Verhältnis in NW entspricht eher dem Muster von Hochwasseropfern in Europa, USA und Australien [32]. Besonders betroffen waren Menschen mit körperlichen bzw. geistigen Einschränkungen: Zwölf Bewohnerinnen und Bewohner einer Pflegeeinrichtung starben in ihren überfluteten Wohnräumen [32].

Eine weitere vulnerable Gruppe sind die Einsatzkräfte. Sie sind großen körperlichen Gefahren ausgesetzt – durch Verletzungen, Vergiftungen und die große psychische Belastung. Die Vorbereitung auf Katastropheneinsätze und die nachsorgende Betreuung kann die Vulnerabilität dieser Gruppe reduzieren. Eine amerikanische Studie zu den gesundheitlichen Risiken bei Aufräumarbeiten nach Extremereignissen ergab, dass berufsbedingte Todesfälle im Median 36,5 Tage nach einem Sturm(flut)-Ereignis auftraten und am häufigsten bei Aufräumarbeiten (44 %), Wiederherstellungsarbeiten (26 %), Wiederherstellung öffentlicher Versorgungseinrichtungen (8 %) und Aufgaben der Sicherung/Polizei (6 %) [92]. Ebenso werden Tierbisse bei Rettungskräften und Tierhalterinnen und -haltern beschrieben [65].

3. Anpassungsmaßnahmen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen

Um die Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen zu erhöhen, lassen sich präventive Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen ergreifen. Dazu zählen sowohl Maßnahmen,

Neben staatlichen Stellen muss auch die Bevölkerung befähigt werden, im Katastrophenfall selbständig zur Krisenbewältigung beizutragen (Selbstschutz).

die verschiedene Ereignistypen adressieren, als auch ereignisspezifische Maßnahmen.

Der Selbstschutz ist ein wichtiges Element in der gesamtgesellschaftlichen Sicherheitsvorsorge. Da Rettungskräfte bei großflächigen Schadenslagen nicht überall gleichzeitig sein können oder ggf. auch selbst betroffen sein können und es somit einige Zeit dauern kann, bis staatliche Hilfe eintrifft, trägt eine Bevölkerung, die sich vorsorgend auf Notsituationen vorbereitet hat, entscheidend mit dazu bei, Notsituationen gemeinschaftlich zu bewältigen [93–95]. Soziale Netzwerke stellen dabei ein wichtiges Kapital für das Entstehen spontaner ziviler Katastrophenhilfe dar, die oftmals für die ersten Stunden nach einem Schadensereignis von großer Bedeutung ist [96]. Die Stärkung sozialer Netzwerke in Vereinen, kirchlichen Einrichtungen und durch verschiedene Formen ehrenamtlichen Engagements ist ein abstraktes und schwer zu erreichendes Ziel, aber dennoch wichtiger Baustein gesellschaftlicher Resilienz. In einem ersten Schritt müssen Politik und Gesellschaft die Wichtigkeit dieser Netzwerke für gesellschaftliche Resilienz erkennen, um diese Institutionen zu fördern.

Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) bietet für verschiedene Gefahrenarten (z. B. zu Starkregen, Stürmen, Hitzewellen) eigene Themenseiten mit Handlungsempfehlungen auf seiner Internetpräsenz an [94, 97]. Ebenso ist eine rechtzeitige Risikokommunikation und Warnung der Bevölkerung unerlässlich, um gesundheitliche Folgen von Extremwetterereignissen zu minimieren. Hierzu wird in Deutschland ein Warnmittelmix (Sirene, Warn-Apps, Cell-Broadcast – Nachrichten an alle Mobilfunknutzer ausgewählter Funkzellen – etc.) eingesetzt und stetig weiterentwickelt. Je früher die Bevölkerung gewarnt wird, desto eher kann sie sich auf das Ereignis vorbereiten und Vorsorgemaßnahmen treffen oder aus einem Gebiet evakuiert werden [95, 98, 99].

Die Sicherstellung der Wasserversorgung während und nach Extremwetterereignissen ist besonders wichtig. Hierfür können drei Verantwortungsbereiche benannt werden: Wasserversorgungsunternehmen (WVU) erstellen zur Aufrechterhaltung der Versorgung Maßnahmenpläne. Kann die Versorgung in einem Ereignisfall seitens WVU nicht mehr aufrechterhalten werden, können Kommunen (mit Unterstützung des Kreises oder des Bundeslandes) bei Ersatzversorgungsmaßnahmen helfen (z. B. temporäres Verlegen von Verbindungsleitungen). Hierfür stehen u. a. örtliche Katastrophenschutzbehörden des Kreises und der kreisfreien Städte zur Verfügung. Bei gestiegenem Ausmaß eines Versorgungsausfalls kann der Bund gemäß §12 Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG) einen Beitrag zur Ersatzversorgung (z. B. durch autarke Brunnen, Transportbehälter, mobile Aufbereitungsanlagen) leisten. Nach Überschwemmungs- oder während Dürreereignissen können Kommunen Abkochgebote aussprechen, damit Keime abgetötet werden und die Trinkwasserqualität sichergestellt wird [100].

Um Hochwasserrisiken und Schadenspotenziale in Deutschland und Europa zu beschreiben und diesbezügliche Maßnahmen zu bündeln, wurde am 26.11.2007 die Europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie [101] in Kraft gesetzt und am 01.03.2010 in nationales Recht überführt. Ferner ist am 01.09.2021 der länderübergreifende Raumordnungsplan für den Hochwasserschutz in Kraft getreten [102]. Ebenso können Starkregengefahrenkarten

dazu beitragen, die Bevölkerung zu sensibilisieren oder erforderliche bauliche Maßnahmen zu ergreifen [103].

Um die besonders vulnerable Gruppe der Einsatzkräfte bei Waldbränden zu schützen und diese auf Einsätze vorzubereiten, hat der deutsche Feuerwehrverband eine Empfehlung zur Sicherheit und Taktik im Vegetationsbrandeinsatz herausgegeben [104]. Die Bevölkerung kann mit Informationstafeln, Flyern [81, 105] und weiteren Informationsangeboten wie dem Waldbrandgefahren- [106] und Graslandfeuerindex [107] des Deutschen Wetterdienstes (beide jeweils im Zeitraum März bis Oktober eines Jahres aktuell verfügbar) über Waldbrandgefahren und richtiges Verhalten informiert werden. Zusätzlich können zur Waldbrandprävention waldbauliche Maßnahmen umgesetzt werden, wie beispielsweise das Anlegen von Brandschutzstreifen oder das Erhöhen des Laubholzanteils in Nadelwäldern sowie eine Aufforstung mit Laub- statt Nadelbäumen [105]. Für die frühzeitige Erkennung und Bekämpfung von Waldbränden wird in Niedersachsen, Brandenburg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Sachsen-Anhalt das Automatisierte Waldbrand-Früherkennungs-System (AWFS) verwendet [105, 108].

Einen politischen Rahmen, um die Resilienz Deutschlands gegenüber Extremwetterereignissen zu stärken, bilden Strategien, anhand derer Maßnahmen definiert und umgesetzt werden können, z. B. die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, die Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen sowie die Nationale Wasserstrategie [109–111].

4. Diskussion und Fazit

Es ist zu erwarten, dass Extremwetterereignisse, die bereits in der Vergangenheit substanzielle Gesundheitsrisiken für Deutschland mit sich brachten, aufgrund des Klimawandels zukünftig häufiger auftreten werden. Am deutlichsten ist die Evidenz für Hitzewellen, jedoch werden auch hydrologische Ereignisse (Starkregen, Überschwemmungen, Dürren) wahrscheinlich zunehmen. Für Stürme ist die Evidenz hingegen weniger eindeutig.

Eine zentrale Botschaft ist an dieser Stelle, dass Extremwetterereignisse nur dann Katastrophen auslösen können, wenn sie auf eine vulnerable Bevölkerung und/oder eine vulnerable Infrastruktur treffen. Auch wenn die Komplexität von Mensch-Umweltsystemen es unmöglich macht, alle Wechselwirkungen vorherzusehen, so kann durch Anpassungsmaßnahmen das Risiko erheblich reduziert werden. Viele Anpassungsmaßnahmen schützen dabei vor unterschiedlichen Risiken gleichzeitig. Neben planerischen Maßnahmen sind dies auch die Erhöhung der Selbstschutzfähigkeit in der Bevölkerung durch Wissen und die Stärkung sozialer Netzwerke.

Das Gesundheitssystem muss in der Lage sein, auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen auf Extremwetterereignisse zu reagieren. In Katastrophensituationen müssen Verletzungen und Vergiftungen vor Ort behandelt werden und es ist notwendig, die kontinuierliche Versorgung Vorerkrankter und Schwangerer sicherzustellen, um Langzeitfolgen zu minimieren. Bei der Organisation von Hilfemaßnahmen ist es wichtig, vulnerable Gruppen und ihre Bedürfnisse in den Blick zu nehmen. Hierfür wäre es z. B. wichtig zu erfassen, wo Menschen leben, die sich in einem

Katastrophenfall nicht selbst in Sicherheit bringen können. Mittel- und langfristig ist die Wiederherstellung der psychischen Gesundheit wichtig, auch hierfür müssen im Gesundheitssystem Ressourcen vorgehalten werden. Das bedeutet auch, dass die Schaffung von Kapazitäten, um auf die hier skizzierten Herausforderungen kurz-, mittel- und langfristig reagieren zu können, Bestandteil der Anpassung an den Klimawandel sein muss. Dies betrifft neben dem Katastrophenschutz auch das Gesundheitssystem, in dem notwendige Reservekapazitäten geschaffen und dauerhaft vorgehalten werden müssen.

Eine Schwierigkeit bei der Erfassung der gesundheitlichen Folgen von Extremwetterereignissen ist die oft unzureichende Datenlage – sowohl was die Ereignisse selbst angeht als auch die gesundheitlichen Folgen. Vor allem die mittelbaren Folgen, die sich über Risikokaskaden entfalten, werden nicht systematisch erfasst. Für ein zukünftig verbessertes Risikomanagement wäre die Schaffung einer Datenbank mit vergleichbaren Fallstudien eine wichtige Wissensbasis. Diese sollte die angesprochenen unterschiedlichen Arten von Daten und Wissen integrieren – von meteorologischen Beobachtungen bis hin zu Beschreibungen des Ereignisses durch die Bevölkerung – und es ermöglichen, kaskadierende Wirkungsketten auch in Zahlen zu fassen.

Mit Blick auf die vorliegenden Kenntnisse zu den zukünftigen Entwicklungen ist es für alle Akteurinnen und Akteure empfehlenswert, bestehende Schutzniveaus zu prüfen. Behörden, Gesundheitssystem, Zivilgesellschaft und Bürgerinnen und Bürger müssen sich der Verschiebung von Risiken bewusst sein und innerhalb ihrer Handlungsspielräume eine aktive Anpassung betreiben. Dabei müssen insbesondere vulnerable Gruppen, die sich nicht selbst helfen können, beachtet werden. Der gesellschaftliche Umgang mit veränderten Risiken wird in den nächsten Dekaden große Herausforderungen mit sich bringen. Dazu gehört auch die Aushandlung von Verantwortlichkeiten für Vorsorge und Schadensbewältigung. Ein wichtiger Schlüssel zur Förderung gesellschaftlicher Resilienz ist in diesem Zusammenhang die Befähigung zum Selbstschutz – individuell und in sozialen Verbünden.

Verschiedene Bestandteile des Risikomanagements von Extremwetterereignissen müssen aufgrund des Klimawandels überprüft und ggf. angepasst werden.

Korrespondenzadresse
PD Dr. Carsten Butsch
Geographisches Institut der Universität Bonn
Meckenheimer Allee 166
53115 Bonn
E-Mail: butschc@uni-bonn.de

Zitierweise
Butsch C, Beckers LM, Nilson E, Frassl M, Brennholt N et al. (2023) Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel. J Health Monit 8(S4): 35–60. DOI 10.25646/11646

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter: www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Liza-Marie Beckers arbeitet im BMDV-Expertennetzwerk, welches durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert wird.

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024).

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Danksagung

Das RKI-Koordinationsteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pörtner HO, Roberts DC, Tignor M et al. (Hrsg) Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/ (Stand: 22.05.2023)
2. Broska LH, Poganietz W, Vögele S (2020) Extreme events defined – A conceptual discussion applying a complex systems approach. Futures 115:102490
3. McPhillips LE, Chang H, Chester MV et al. (2018) Defining extreme events: A cross-disciplinary review. Earth's Future 6(3):441–455
4. Winklmayr C, Matthies-Wiesler F, Muthers S et al. (2023) Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. J Health Monit 8(S4):3-34. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)
5. IPCC (2012) Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field CB, Barros V, Stocker TF et al. (Hrsg) Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/ (Stand: 23.05.2023)
6. Kahlenborn W, Porst L, Voß M et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 (Kurzfassung). Umweltbundesamt (Hrsg) Climate Change, Vol 26/2021. www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung (Stand: 29.05.2023)
7. Hertig E, Hunger I, Kaspar-Ott I et al. (2023) Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023. J Health Monit 8(S3):7–35. https://edoc.rki.de/handle/176904/11074 (Stand: 19.06.2023)
8. IPCC (2021) Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al. (Hrsg) Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimänderungen. www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf (Stand: 22.05.2023)
9. World Meteorological Organization (2017) WMO guidelines on the calculation of climate normals. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20130 (Stand: 25.05.2023)
10. Deutscher Wetterdienst (2022) Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2021. DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach am Main. www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2021.html (Stand: 29.05.2023)
11. Vautard R, van Aalst M, Boucher O et al. (2020) Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. Environ Res Lett 15(9):094077
12. Deutscher Wetterdienst (2022) Deutscher Klimaatlas. www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.htm (Stand: 22.05.2023)
13. Deutscher Wetterdienst (2022) CDC – Climate Data Center. https://cdc.dwd.de/portal (Stand: 22.12.2022)
14. Bundesanstalt für Gewässerkunde (2021) Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland – Analyse, Einordnung und Auswirkungen. Mitteilungen Nr 35. BfG, Koblenz. https://doi.bafg.de/BfG/2020/BfG_Mitteilungen_35.2021.pdf (Stand: 29.05.2023)

15. Die Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Elbe (2021) Hochwasserrisikomanagementplan für den deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe für den Zeitraum von 2021 bis 2027 gemäß § 75 WHG. FGG Elbe, Magdeburg. www.fgg-elbe.de/hwrm-rl/hwrm-plan.html?file=files/Downloads/HWRM_RL/ber/hwrmp_2021/HWRM-Plan_FGG_Elbe_2021.pdf (Stand: 29.05.2023)

16. Norddeutsches Küsten- und Klimabüro, Helmholtz-Zentrum Hereon (2022) Sturmflut Monitor. https://sturmflut-monitor.de/ (Stand: 22.12.2022)

17. Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg (2021) Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen. DWD und Extremwetterkongress Hamburg. www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/210922/Faktenpapier-Extremwetterkongress.html (Stand: 29.05.2023)

18. Kreienkamp F, Philip SY, Tradowsky JS et al. (2021) Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. World Weather Attribution. www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf (Stand: 29.05.2023)

19. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2015) Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030. UNISDR, Geneva, Switzerland. www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015–2030 (Stand: 29.05.2023)

20. Pescaroli G, Alexander D (2018) Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: A holistic framework. Risk Anal 38(11):2245–2257

21. Shimizu M, Clark A (2015) Interconnected risks, cascading disasters and disaster management policy: A gap analysis. Planet@Risk 3(2):260–270

22. Butsch C, Kraas F, Namperumal S et al. (2016) Risk governance in the megacity Mumbai/India – A complex adaptive system perspective. Habitat Int 54(Part 2):100–111

23. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2022) EM-DAT, the International Disaster Database. https://public.emdat.be (Stand: 11.11.2022)

24. European Environment Agency (2017) Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report. EEA Report No 1/2017. EEA, Copenhagen. www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016/at_download/file (Stand: 29.05.2023)

25. Sen A (1983) Poverty and famines: An essay on entitlement and deprivation. Oxford University Press, Oxford

26. Coronese M, Lamperti F, Keller K et al. (2019) Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters. Proc Natl Acad Sci U S A 116(43):21450–21455

27. European Commission Joint Research Centre (2018) Europe needs coastal adaptation measures to avoid catastrophic flooding by the end of the century. News announcement 13.08.2018. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/europe-needs-coastal-adaptation-measures-avoid-catastrophic-flooding-end-century-2018–08-13_en (Stand: 29.05.2023)

28. Yari A, Ostadtaghizadeh A, Ardalan A et al. (2020) Risk factors of death from flood: Findings of a systematic review. J Environ Health Sci Eng 18(2):1643–1653

29. Crawford SE, Brinkmann M, Ouellet JD et al. (2022) Remobilization of pollutants during extreme flood events poses severe risks to human and environmental health. J Hazard Mater 421:126691

30. Umweltbundesamt (2021) Schadstoffe in Böden nach Hochwasserereignissen. UBA, Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/20210812_factsheet_schadstoffe_in_boeden_nach_hochwasser_final.pdf (Stand: 29.05.2023)

31. Ebi KL, Vanos J, Baldwin JW et al. (2021) Extreme weather and climate change: Population health and health system implications. Annu Rev Public Health 42:293–315

32. Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V. (2022) Die Flutkatastrophe im Juli 2021 in Deutschland. Ein Jahr danach: Aufarbeitung und erste Lehren für die Zukunft. DKKV-Schriftenreihe Nr 62. DKKV, Bonn. https://dkkv.org/wp-content/uploads/2023/02/DKKV__Schriftenreihe_Juli_2022__Webversion__-_2te_Version_August3.pdf (Stand: 29.05.2023)

33. Guihenneuc J, Ayraud-Thevenot S, Roschnik S et al. (2023) Climate change and health care facilities: A risk analysis framework through a mapping review. Environ Res 216(Pt 3):114709

34. Saulnier DD, Brolin Ribacke K, von Schreeb J (2017) No calm after the storm: A systematic review of human health following flood and storm disasters. Prehosp Disaster Med 32(5):568–579

35. Gautam S, Menachem J, Srivastav SK et al. (2009) Effect of hurricane Katrina on the incidence of acute coronary syndrome at a primary angioplasty center in New Orleans. Disaster Med Public Health Prep 3(3):144–150

36. Barbeau DN, Grimsley LF, White LE et al. (2010) Mold exposure and health effects following hurricanes Katrina and Rita. Annu Rev Public Health 31:165–178

37. Dietrich J, Hammerl JA, Johne A et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf lebensmittelbedingte Infektionen und Intoxikationen. J Health Monit 8(S3):85–101. https://edoc.rki.de/handle/176904/11076 (Stand: 19.06.2023)

38. Bell JE, Brown CL, Conlon K et al. (2018) Changes in extreme events and the potenzial impacts on human health. J Air Waste Manag Assoc 68(4):265–287

39. Mavrouli M, Mavroulis S, Lekkas E et al. (2022) Infectious diseases associated with hydrometeorological hazards in Europe: Disaster risk reduction in the context of the climate crisis and the ongoing COVID-19 pandemic. Int J Environ Res Public Health 19(16):10206

40. Beermann S, Dobler G, Faber M et al. (2023) Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten. J Health Monit 8(S3):36–66. https://edoc.rki.de/handle/176904/11075 (Stand: 19.06.2023)

41. Lane K, Charles-Guzman K, Wheeler K et al. (2013) Health effects of coastal storms and flooding in urban areas: A review and vulnerability assessment. J Environ Public Health 2013:913064

42. Launay MA, Dittmer U, Steinmetz H (2016) Organic micropollutants discharged by combined sewer overflows – Characterisation of pollutant sources and stormwater-related processes. Water Res 104:82–92

43. Beckers LM, Busch W, Krauss M et al. (2018) Characterization and risk assessment of seasonal and weather dynamics in organic pollutant mixtures from discharge of a separate sewer system. Water Res 135:122–133

44. Madoux-Humery AS, Dorner S, Sauvé S et al. (2013) Temporal variability of combined sewer overflow contaminants: Evaluation of wastewater micropollutants as tracers of fecal contamination. Water Res 47(13):4370–4382

45. Euripidou E, Murray V (2004) Public health impacts of floods and chemical contamination. J Public Health (Oxf) 26(4):376–383

46. Yu P, Zaleski A, Li Q et al. (2018) Elevated levels of pathogenic indicator bacteria and antibiotic resistance genes after hurricane Harvey's flooding in Houston. Environ Sci Technol Lett 5(8):481–486

47. Gertler M, Dürr M, Renner P et al. (2015) Outbreak of *Cryptosporidium hominis* following river flooding in the city of Halle (Saale), Germany, August 2013. BMC Infect Dis 15:88

48. Münzel T, Hahad O, Daiber A et al. (2023) Soil and water pollution and human health: What should cardiologists worry about? Cardiovasc Res 119(2):440–449

49. Palinkas LA, Wong M (2020) Global climate change and mental health. Curr Opin Psychol 32:12–16

50. Weilnhammer V, Schmid J, Mittermeier I et al. (2021) Extreme weather events in Europe and their health consequences – A systematic review. Int J Hyg Environ Health 233:113688

51. Bubeck P, Thieken AH (2018) What helps people recover from floods? Insights from a survey among flood-affected residents in Germany. Reg Environ Change 18(1):287–296

52. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2023) Sturmfluten – Berichte zu Sturmfluten und extremen Wasserständen. www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/sturmfluten_node.html (Stand: 08.05.2023)

53. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (2016) A primer on flood protection – Protecting property and building wisely. www.bbsr.bund.de/BBSR/EN/publications/ministries/BMUB/issues/2016-primer-flood-protection.html (Stand: 22.05.2023)

54. Pinto J, Reyers M (2017) Winde und Zyklonen. In: Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg) Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 67–75

55. Kandarr J (2019) Das richtige Verhalten bei Tornados. Earth Systems Knowledge Platform 6 (4. März). www.eskp.de/naturgefahren/das-richtige-verhalten-bei-tornados-9351030/ (Stand: 29.05.2023)

56. Deutscher Wetterdienst (2022) Unberechenbare Naturgewalt. Achtung: Tornado. DWD, Offenbach. www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/presse/tornado_pdf.html (Stand: 29.05.2023)

57. Dresser C, Hart A, Kwok-Keung Law A et al. (2022) Where are people dying in disasters, and where is it being studied? A mapping review of scientific articles on tropical cyclone mortality in English and Chinese. Prehosp Disaster Med 37(3):409–416

58. Diaz JH (2006) Global climate changes, natural disasters, and travel health risks. J Travel Med 13(6):361–372

59. Johanning E, Auger P, Morey PR et al. (2014) Review of health hazards and prevention measures for response and recovery workers and volunteers after natural disasters, flooding, and water damage: Mold and dampness. Environ Health Prev Med 19(2):93–99

60. Babaie J, Pashaei Asl Y, Naghipour B et al. (2021) Cardiovascular diseases in natural disasters; a systematic review. Arch Acad Emerg Med 9(1):e36

61. Harville E, Xiong X, Buekens P (2010) Disasters and perinatal health: A systematic review. Obstet Gynecol Surv 65(11):713–728

62. Jang S, Ekyalongo Y, Kim H (2021) Systematic review of displacement and health impact from natural disasters in Southeast Asia. Disaster Med Public Health Prep 15(1):105–114

63. King S, Dancause K, Turcotte-Tremblay AM et al. (2012) Using natural disasters to study the effects of prenatal maternal stress on child health and development. Birth Defects Res C Embryo Today 96(4):273–288

64. Casey JA, Fukurai M, Hernández D et al. (2020) Power outages and community health: A narrative review. Curr Environ Health Rep 7(4):371–383

65. Warner GS (2010) Increased incidence of domestic animal bites following a disaster due to natural hazards. Prehosp Disaster Med 25(2):188–190

66. Sharpe I, Davison CM (2021) Climate change, climate-related disasters and mental disorder in low- and middle-income countries: A scoping review. BMJ Open 11(10):e051908

67. Gamble JL, Hurley BJ, Schultz PA et al. (2013) Climate change and older Americans: State of the science. Environ Health Perspect 121(1):15–22

68. Stanke C, Kerac M, Prudhomme C et al. (2013) Health effects of drought: A systematic review of the evidence. PLoS Curr 5:ecurrents.dis.7a2cee9e980f91ad7697b570bcc4b004

69. Salvador C, Nieto R, Linares C et al. (2020) Effects of droughts on health: Diagnosis, repercussion, and adaptation in vulnerable regions under climate change. Challenges for future research. Sci Total Environ 703:134912

70. Breitner-Busch S, Mücke HG, Schneider A et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft. J Health Monit 8(S4):111–131. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

71. Baldermann C, Laschewski G, Grooß J (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch veränderte UV-Strahlung. J Health Monit 8(S4):61–81. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

72. Cianconi P, Betrò S, Janiri L (2020) The impact of climate change on mental health: A systematic descriptive review. Front Psychiatry 11:74

73. Berry HL, Hogan A, Owen J et al. (2011) Climate change and farmers' mental health: Risks and responses. Asia Pac J Public Health 23(2 Suppl):119S–32

74. Ellis NR, Albrecht GA (2017) Climate change threats to family farmers' sense of place and mental wellbeing: A case study from the Western Australian wheatbelt. Soc Sci Med 175:161–168

75. Padhy SK, Sarkar S, Panigrahi M et al. (2015) Mental health effects of climate change. Indian J Occup Environ Med 19(1):3–7

76. Gebhardt N, van Bronswijk K, Bunz M et al. (2023) Scoping Review zu Klimawandel und psychischer Gesundheit in Deutschland – Direkte und indirekte Auswirkungen, vulnerable Gruppen, Resilienzfaktoren. J Health Monit 8(S4):132–161. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

77. Mosley LM (2015) Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. Earth Sci Rev 140:203–214

78. Dupke S, Buchholz U, Fastner J et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf wasserbürtige Infektionen und Intoxikationen. J Health Monit 8(S3):67–84. https://edoc.rki.de/handle/176904/11077 (Stand: 19.06.2023)

79. Chorus I, Welker M (Hrsg) (2021) Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva.

80. Brown L, Medlock J, Murray V (2014) Impact of drought on vector-borne diseases--how does one manage the risk? Public Health 128(1):29–37

81. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2022) Waldbrand. Schützen Sie Ihren Wald. BBK, Bonn. www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Flyer/flyer_waldbrand.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Stand: 13.12.2022)

82. Köhl M, Plugge D, Gutsch M et al. (2017) Wald und Forstwirtschaft. In: Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg) Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 193–201

83. Kollanus V, Prank M, Gens A et al. (2017) Mortality due to vegetation fire-originated $PM_{2.5}$ exposure in Europe – Assessment for the years 2005 and 2008. Environ Health Perspect 125(1):30–37

84. Xu R, Yu P, Abramson MJ et al. (2020) Wildfires, global climate change, and human health. N Engl J Med 383(22):2173–2181

85. van Daalen KR, Romanello M, Rocklöv J et al. (2022) The 2022 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: Towards a climate resilient future. Lancet Public Health 7(11):e942–e965

86. UFZ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (2022) Dürren in Deutschland. Dürreintensitäten in der Vegetationsperiode April bis Oktober. www.ufz.de/index.php?de=47252 (Stand: 12.12.2022)

87. Rakovec O, Samaniego L, Hari V et al. (2022) The 2018–2020 multi-year drought sets a new benchmark in Europe. Earth's Future 10(3):e2021EF002394

88. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022) Waldbrände und ihre Ursachen. BMEL. www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SJT-7011300–0000.xlsx. (Stand: 08.12.2022)

89. European Commission (2022) EFFIS – European Forest Fire Information System. https://effis.jrc.ec.europa.eu/ (Stand: 12.12.2022)

90. Bund-Länder Demografieportal (2023) Altersstruktur der Bevölkerung in Nordrhein-Westfalen. www.demografie-portal.de/DE/Fakten/bevoelkerung-altersstruktur-nordrhein-westfalen.html (Stand: 12.04.2023)

91. Thompson RR, Garfin DR, Silver RC (2017) Evacuation from natural disasters: A systematic review of the literature. Risk Anal 37(4):812–839

92. Fayard GM (2009) Fatal work injuries involving natural disasters, 1992–2006. Disaster Med Public Health Prep 3(4):201–209

93. Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen (2015) Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz (BHKG). https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=6112016062416075803 1 (Stand: 22.12.2022)

94. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2019) Ratgeber für Notfallvorsorge und richtiges Handeln in Notsituationen. BBK. www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Buergerinformationen/Ratgeber/ratgeber-notfallvorsorge.pdf?__blob=publicationFile&v=15 (Stand: 29.05.2023)

95. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2019) Klimawandel – Herausforderungen für den Bevölkerungsschutz. Band 5 – Praxis im Bevölkerungsschutz. BBK. www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-05-klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (Stand: 22.12.2022)

96. Twigg J, Mosel I (2017) Emergent groups and spontaneous volunteers in urban disaster response. Environ Urban 29(2):443–458

97. Fischer B (2019) Verstärkte Naturgefahren durch den Klimawandel wirken auf Gebäude. BBK Bevölkerungsschutz (Klimawandel und Bevölkerungsschutz) 2019(2):21–24

98. Rahn M, Tomczyk S, Schmidt S (2020) Bekanntheit und Nutzung von Warnmitteln in Deutschland. BBK Bevölkerungsschutz (Warnung der Bevölkerung) 2020(3):21–23

99. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bundesamt für Risikobewertung (2022) Risikokommunikation. Ein Handbuch für die Praxis. BBK, BfR, Bonn. www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Risikomanagement/handbuch-risikokommunikation.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Stand: 22.12.2022)

100. Wienand I, Broß L, Lübbers N et al. (2020) Sichere Wasserversorgung? Erhöhung der Resilienz durch Maßnahmen des Risiko- und Krisenmanagements. BBK Bevölkerungsschutz (Resilienz) 2020(1):20–23

101. Europäische Union (2007) Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-DE/TXT/?from=DE&uri=CELEX%3A32007L0060 (Stand: 14.08.2023)

102. Bundesministerium des Innern und für Heimat (2021) Anlage zur Verordnung über die Raumordnung im Bund für einen länderübergreifenden Hochwasserschutz (BRPHV). In: Bundesministerium für Justiz (Hrsg) Anlageband zum Bundesgesetzblatt Teil I Nr 57 vom 25. August 2021 G5702

103. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2022) Land Nordrhein-Westfalen, Starkregengefahrenhinweise. https://geoportal.de/Info/tk_04-starkregengefahrenhinweise-nrw (Stand: 12.12.2022)

104. Deutscher Feuerwehrverband (2020) DFV-Empfehlung: Sicherheit und Taktik im Vegetationsbrandeinsatz. DFV, Berlin. www.feuerwehrverband.de/app/uploads/2020/06/DFV-FE_Vegetationsbrand_2020.pdf (Stand: 22.12.2022)

105. Niedersächsische Landesforsten (2023) Spezialseite Waldbrand. www.landesforsten.de/nlf-spezial/waldbrand/ (Stand: 08.02.2023)

106. Deutscher Wetterdienst (2022) Waldbrandgefahrenindex. www.dwd.de/DE/leistungen/waldbrandgef/waldbrandgef.html?nn=16102 (Stand: 13.12.2022)

107. Deutscher Wetterdienst (2022) Graslandfeuerindex. www.dwd.de/DE/leistungen/graslandfi/graslandfi.html?nn=16102 (Stand: 13.12.2022)

108. Kompetenz- und Informationszentrum Wald und Holz (2023) Wissenswertes: Waldbrand-Früherkennung. www.kiwuh.de/service/wissenswertes/wissenswertes/waldbrand-frueherkennung (Stand: 23.03.2023)

109. Die Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. www.bmuv.de/download/deutsche-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel (Stand: 22.05.2023)

110. Die Bundesregierung (2022) Deutsche Strategie zur Stärkung der Resilienz gegenüber Katastrophen. Umsetzung des Sendai Rahmenwerks für Katastrophenvorsorge (2015–2030) – Der Beitrag Deutschlands 2022–2030. www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/BMI22017-resilienz-katastrophen.pdf (Stand: 22.12.2022)

111. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2022) Nationale Wasserstrategie. Regierungsentwurf vom 25.11.2022. www.bmuv.de/download/regierungsentwurf-nationale-wasserstrategie (Stand: 22.12.2022)

Impressum

Journal of Health Monitoring
www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber
Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur
Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen
Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter, Dr. Kirsten Kelleher,
Dr. Livia Ryl, Simone Stimm

Satz
WEBERSUPIRAN.berlin, Alexander Krönke

Bildnachweis
Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis
Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Robert Koch-Instituts wider.

Corrigendum

Die Verwendung des Begriffs „Fließzeiten“ im Satzteil „Hohe Wassertemperaturen und geringere Fließzeiten während sommerlicher Niedrigwasser werden mit dem Massenaufkommen von potenziell toxischem Phytoplankton (Algenblüte) in Verbindung gebracht, …“ (Seite 47) führte zu einer inhaltlich fehlerhaften Aussage. Der korrekte Satzteil lautet:
„Hohe Wassertemperaturen und geringere Fließgeschwindigkeiten während sommerlicher Niedrigwasser werden mit dem Massenaufkommen von potenziell toxischem Phytoplankton (Algenblüte) in Verbindung gebracht, …“
Der Beitrag wurde entsprechend geändert.

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S4)
DOI 10.25646/11647
Robert Koch-Institut, Berlin

Cornelia Baldermann[1], Gudrun Laschewski[2], Jens-Uwe Grooß[3]

[1] Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg/Oberschleißheim
FG WR 4 – Optische Strahlung
[2] Deutscher Wetterdienst, Freiburg
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
[3] Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung – Stratosphäre (IEK-7)

Eingereicht: 05.01.2023
Akzeptiert: 26.06.2023
Veröffentlicht: 06.09.2023

Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch veränderte UV-Strahlung

Abstract

Hintergrund: UV-Strahlung kann zu ernsten Erkrankungen von Haut und Augen führen, insbesondere Krebserkrankungen. UV-bedingte Hautkrebsinzidenzen steigen seit Jahrzehnten an. Entscheidend hierfür ist die individuelle UV-Belastung. Klimawandelbedingte Änderungen atmosphärischer Faktoren können Einfluss auf die individuelle UV-Belastung nehmen.

Methode: Auf Basis einer themenspezifischen Literaturrecherche wird eine Übersichtsarbeit erstellt und durch noch nicht publizierte Ergebnisse eigener Studien ergänzt. Es werden der wissenschaftliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie primärpräventive Handlungsempfehlungen formuliert.

Ergebnisse: Der Klimawandel verändert in Deutschland die Einflussfaktoren auf die UV-Bestrahlungsstärke und die UV-Jahresdosis. Erste Auswertungen von Satellitendaten für Deutschland zeigen für das letzte Jahrzehnt im Vergleich zu den letzten drei Jahrzehnten eine Erhöhung der mittleren UV-Spitzenbelastungen und UV-Jahresdosis.

Schlussfolgerungen: Die klimawandelbedingten Einflüsse auf die individuelle UV-Belastung und das damit verbundene individuelle Krankheitsgeschehen lassen sich aufgrund von erheblichen Unsicherheiten gegenwärtig noch nicht belastbar vorhersagen. Aber bereits das derzeitige UV-bedingte Krankheitsgeschehen drängt zu primärpräventiven Maßnahmen zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

KLIMAWANDEL · UV-STRAHLUNG · OZON · BEWÖLKUNG · GESUNDHEIT · ANPASSUNG

1. Einleitung

Der Klimawandel hat ernste Folgen für Mensch und Umwelt. Katastrophen wie Überschwemmungen, Stürme, Dürren oder Hitzewellen führen dies klar vor Augen. Nicht so offensichtlich, aber darum nicht minder problematisch, sind Auswirkungen des Klimawandels, die für Mensch und Natur negative Folgen haben können, aber unbemerkt wirken und so die Situation schleichend verschlimmern. Eine davon ist die klimawandelbedingte Veränderung der Einflussfaktoren auf die ultraviolette (UV-)Strahlungsbelastung (im vorliegenden Artikel wird UV in Zusammensetzungen oftmals als Kürzel für ultraviolette Strahlung verwendet).

UV-Strahlung ist Initiator der körpereigenen Vitamin-D-Bildung. Gleichzeitig ist UV-Strahlung Hauptursache für Hautkrebs und kann zu weiteren gesundheitlich negativen

UV-Strahlung kann zu ernsten Erkrankungen von Haut und Augen führen, insbesondere Krebserkrankungen.

Folgen für Augen und Haut führen [1, 2]. UV-Strahlung schädigt das Erbgut und ist, wie auch Asbest und ionisierende Strahlung, in die höchste Risikogruppe 1 als „krebserregend für den Menschen“ eingestuft [3]. Vor allem UV-bedingte Krebserkrankungen belasten das Wohl der Allgemeinheit und verursachen hohe Kosten für das Gesundheitswesen [2, 4]. UV-bedingte Gesundheitsschäden an Augen und Haut können grundsätzlich jeden treffen. Kinder sind besonders gefährdet [1].

Dem derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand zufolge verändert der Klimawandel weltweit und auch in Deutschland die Einflussfaktoren der UV-Belastung und damit das UV-bedingte Erkrankungsrisiko der Menschen. Für die individuelle UV-Belastung der Menschen und damit für das UV-bedingte Erkrankungsrisiko spielen neben dem individuellen UV-Expositionsverhalten die in den Lebenswelten der Menschen vorhandenen Strukturen, die – wie beispielsweise Schattenplätze – eine UV-Entlastung bieten, eine entscheidende Rolle [2].

In diesem Beitrag werden die Veränderungen der erdbodennahen UV-Belastung und die sich daraus ergebenden Folgen für die individuelle UV-Belastung und damit für das Gesundheitsrisiko betrachtet sowie Handlungsempfehlungen zur Anpassung gegeben. Die Literaturrecherche für diesen Beitrag erfolgte ausgehend von internationalen Übersichtsarbeiten zu den Themen „Stratosphärisches Ozon“, „Klimawandel“, „Wechselwirkungen zwischen Ozon und Klima und Auswirkungen auf die solare UV-Strahlung“ sowie „Klimawandel, UV-Exposition, menschliche Gesundheit“ unter anderem im kostenlosen Volltextarchiv für biomedizinische und biowissenschaftliche Zeitschriftenliteratur PubMed. Darüber hinaus wurden Berichte und Datenservices nationaler wie internationaler Behörden und deren Literaturverzeichnisse genutzt sowie eigene Studien durchgeführt, die noch nicht publiziert sind. Diese sind mit dem Hinweis „Autor et al.; Daten nicht veröffentlicht“ gekennzeichnet.

2. Entwicklung der erdbodennahen UV-Belastung

2.1 Retrospektive Entwicklung der UV-Belastung

Kennzeichnend für die UV-Strahlung im Lebensraum des Menschen ist eine sehr starke räumliche und zeitliche Variabilität, welche hauptsächlich durch den Sonnenstand, die Dicke der Ozonschicht und die Bewölkung bestimmt wird. Weitere Einflüsse gehen vom Aerosolgehalt der Luft, dem Reflexionsvermögen des Bodens und der Höhenlage des Aufenthaltsortes aus. Änderungen des Sonnenstandes widerspiegeln sich in Änderungen der UV-Strahlung sowohl mit der geografischen Breite, als auch im Laufe des Tages und des Jahres. Der stärkste Absorber der UV-Strahlung, das atmosphärische Ozon, weist üblicherweise höhere Konzentrationen in nördlichen Breiten auf und hat seinerseits einen Jahresgang mit den höchsten Werten im März und April und den niedrigsten Werten im Oktober und November. Durch die anthropogenen Emissionen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) wurde nicht nur das antarktische Ozonloch verursacht, sondern auch global unterschiedlich die Dicke der Ozonschicht reduziert. Durch internationale Vereinbarungen wie das Montrealer Protokoll 1987 und Folgeabkommen wurden die Emissionen der FCKW im Vergleich zu den 1970er- und 1980er-Jahren fast komplett auf null reduziert, so dass die Chlor-Belastung der Atmosphäre seit etwa dem Jahr 2000 zurückgeht und

sich die Dicke der Ozonschicht langsam erholt. Im Falle des Arktischen Ozons konnte das aufgrund der hohen Variabilität bis jetzt noch nicht nachgewiesen werden [5].

Auswirkung der genannten Einflussfaktoren auf die UV-Bestrahlungsstärke

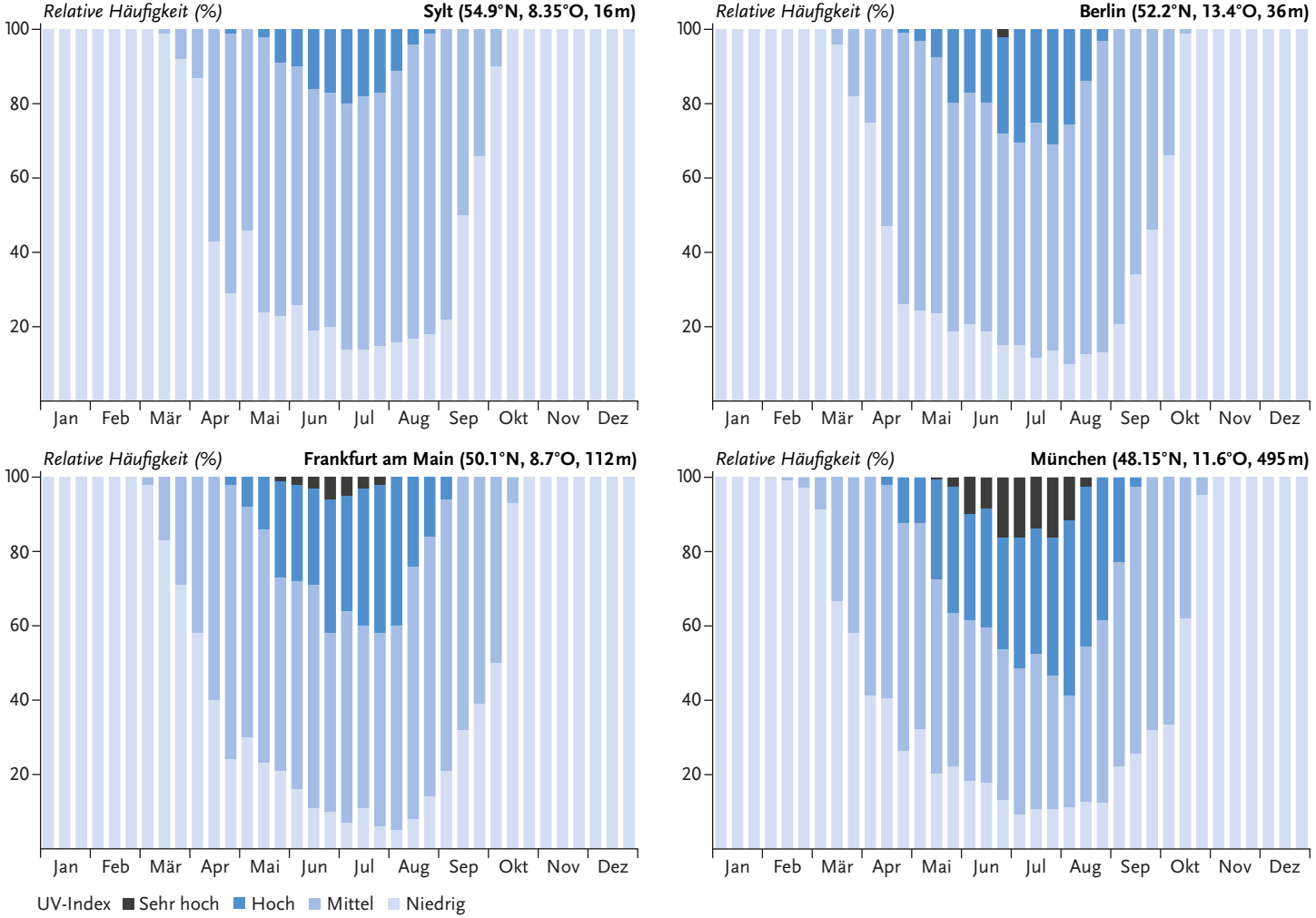
Wie sich die genannten Einflüsse auf die UV-Belastung auswirken, kann man beispielsweise an der mittleren Häufigkeit des Auftretens bestimmter UV-Index-Klassen (keine bis geringe, mittlere, hohe, sehr hohe und extreme Belastung [6]) erkennen. Der UV-Index (UVI) ist eine Maßzahl für das Tagesmaximum der sonnenbrandwirksamen (erythemwirksamen) UV-Bestrahlungsstärke, das auf einer horizontalen Fläche auftritt [6]. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Auswertung von Satellitendaten für Monatsdrittel (Zeitabschnitte von 10±1 Tagen) an vier Orten unterschiedlicher geografischer Breite in Deutschland (Sylt, Berlin, Frankfurt am Main, München). Im langjährigen Mittel (Datengrundlage hier: 1983–2019) treten in Deutschland im Sommer überall hohe UV-Index-Werte (UVI ≥ 6) auf, jedoch gibt es Unterschiede, wie viele Tage und welche weiteren Zeiträume im Frühjahr und Herbst betroffen sind. Der betroffene Zeitraum sowie der mittlere Anteil und die maximale Anzahl der Tage mit hohen UV-Index-Werten innerhalb eines Monatsdrittels sind im Süden größer als im Norden Deutschlands. Bei der hier vorgenommenen Zeit-Einteilung treten in München im Vergleich zu Sylt zusätzlich in drei Monatsdritteln hohe UV-Index-Werte auf. Betrachtet man das Monatsdrittel mit den stärksten Belastungen, so sind in München 37 % mehr hohe UV-Index-Werte zu verzeichnen als in Sylt. Ein ähnliches Muster zeigt sich auch bei den sehr hohen UV-Index-Werten (UVI ≥ 8), mit der Besonderheit, dass sie ganz im Norden in Sylt typischerweise extrem selten auftreten und in der Darstellung des langjährigen Mittels daher keine Rolle spielen. In München sind zehn Monatsdrittel von sehr hohen UV-Index-Werten betroffen, damit fünfmal so viele wie in Berlin, und der maximale Anteil der Tage innerhalb eines Monatsdrittels liegt im Vergleich zu Berlin um 15 % höher. Auf Niedrigozonereignisse, die zu außergewöhnlichen Werten des UVI führen können, wird weiter unten in diesem Abschnitt eingegangen.

In Deutschland verändern sich UV-Bestrahlungsstärke und UV-Jahresdosis und damit die individuelle UV-Strahlungsbelastung.

Veränderung der UV-Belastung

Die UV-Belastung in Deutschland während der jüngeren Vergangenheit unterscheidet sich von den langjährigen mittleren Bedingungen. Dies verdeutlicht ein Mittel der UVI-Anomalien der vier in Abbildung 1 dargestellten Orte, welches für jeden Ort auf den Abweichungen der Monatsdrittel im Zeitraum 2010–2019 von den jeweiligen Monatsdritteln des Gesamtzeitraums 1983–2019 beruht (Abbildung 2). Das Vier-Orte-Mittel in Deutschland zeigt einen statistisch signifikanten Anstieg der Werte des UVI während des Zeitraums 2010–2019 im Vergleich zum langjährigen Mittelwert 1983–2019. Während der Monate Februar bis Juli sind im Mittel ausschließlich positive UVI-Anomalien zu verzeichnen, d. h. hier hatte der UVI in der letzten Dekade im Durchschnitt höhere Werte. Das Ausmaß der Anomalien variiert und erreicht die höchsten Werte um 0,5 UVI (Differenz um 12,5 Milliwatt pro Quadratmeter (mW/m^2) sonnenbrandwirksame UV-Bestrahlungsstärke) Anfang Juli und Anfang Juni. Die mittlere UVI-Anomalie im Monat Juni beträgt 0,35 UVI (8,75 mW/m^2 sonnenbrandwirksame UV-Bestrahlungsstärke). Die positiven UVI-An-

Abbildung 1
Mittlere relative Häufigkeit von UV-Index-Klassen zur Mittagszeit an vier Orten in Deutschland (angegeben sind Breitengrad, Längengrad und Höhe des Ortes über dem Meerespiegel)
Quelle: Eigene Darstellung nach Vitt et al. [7]; Datengrundlage erweitert bis 2019 (Deutscher Wetterdienst)



Darstellung für Monatsdrittel (10 ± 1 Tage) im Zeitraum 1983 – 2019 in Sylt, Berlin, Frankfurt am Main und München, basierend auf Satellitendaten

omalien treten auch zu solchen Zeiten im Jahr auf, die mit Blick auf die gesundheitlichen Folgen der UV-Belastung besonders bedeutsam sind: In der Regel ist im Frühjahr die Haut der meisten Menschen in Deutschland noch sonnenungewohnt und damit besonders gefährdet.

Die Zeit um den Sonnenhöchststand im Juni ist, wie oben dargestellt, durch die höchsten Absolutwerte des UVI im Jahresverlauf gekennzeichnet. Diese auf Satellitendaten basierenden Ergebnisse spiegeln vor allem die Auswirkungen von Veränderungen der Bewölkung und der Ozon-

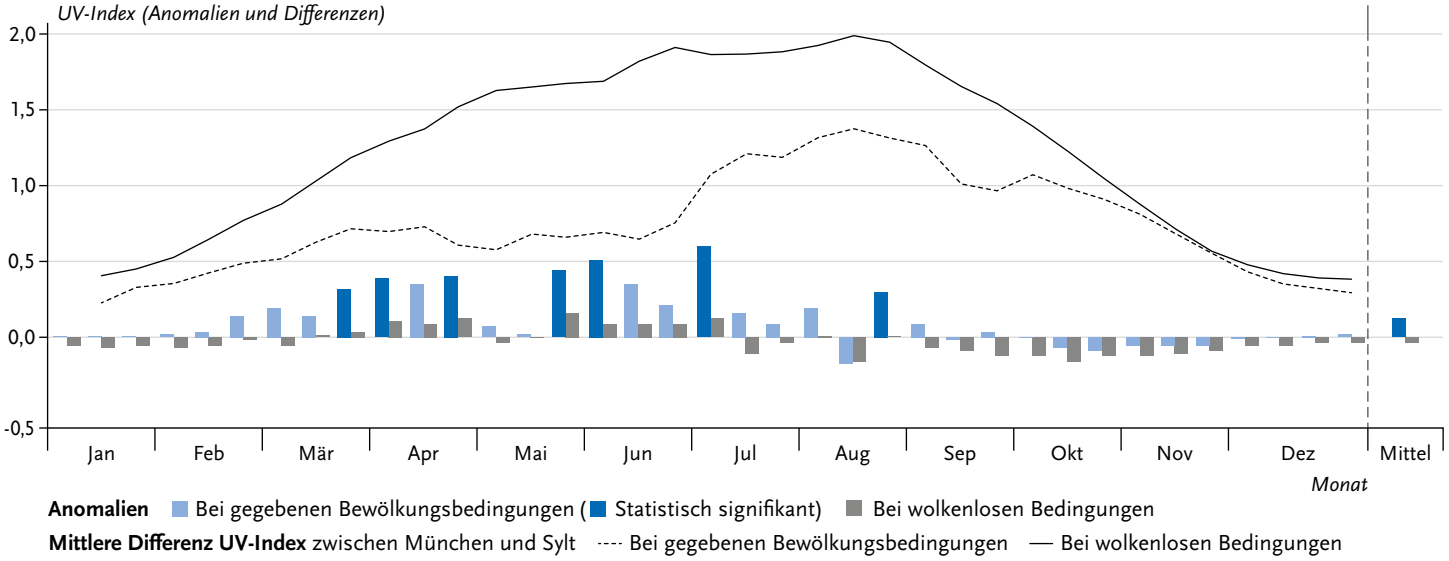


Abbildung 2
Anomalien des UV-Index (UVI) und Differenzen des UVI zwischen München und Sylt. Säulen zeigen Anomalien des UVI im Zeitraum 2010–2019 im Vergleich zu 1983–2019 pro Monatsdrittel (Vier-Orte-Mittel).
Quelle: Eigene Darstellung nach Vitt et al. [7]; Datengrundlage erweitert bis 2019 (Deutscher Wetterdienst)

schichtdicke wider. Die Anomalien des UVI bei wolkenlosem Himmel sind auf dieser Datengrundlage die Folge von Änderungen der Ozonschichtdicke. Im Mittel über das gesamte Jahr ist eine geringe Abnahme der UVI-Anomalie bei wolkenlosem Himmel zu verzeichnen, die als Ausdruck der sich verbessernden Situation der Ozonschicht durch die Umsetzung des Montrealer Protokolls interpretiert werden kann, jedoch nicht statistisch signifikant ist.

Insgesamt geben die Auswertungen der Satellitendaten erste Anzeichen, dass die UV-Belastung in Deutschland während des letzten Jahrzehnts (2010–2019) hauptsächlich durch Rückgänge der Bewölkung im Frühjahr und Sommer geprägt wird. Die Entwicklung der Ozonschicht spielt im Vergleich dazu eine deutlich geringere Rolle ([7], Laschewski et al.; Daten nicht veröffentlicht). Der Einfluss längerfristiger Aerosoländerungen wird mit dieser Datengrundlage nicht abgebildet.

Neben den Tagesmaxima der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke in Form des UVI sind auch die für alle Stunden der Tage eines Jahres aufsummierten Werte in Form der UV-Jahresdosis von Bedeutung, welche in Analogie zum UVI für den Zeitraum 1983–2019 ausgewertet wurden (Laschewski et al.; Daten nicht veröffentlicht). Das Vier-Orte-Mittel in Deutschland deutet auf eine um 2 % pro Jahrzehnt höhere UV-Jahresdosis hin, wenn man den Mittelwert des Zeitraums 2010–2019 mit dem langjährigen Mittelwert von 1983–2019 vergleicht. Die UV-Jahresdosis ist durch eine starke Variabilität von Jahr zu Jahr gekennzeichnet. Im besonders sonnenscheinreichen Jahr 2018 lag die mittlere UV-Jahresdosis der vier Orte in Deutschland um ca. 13 % über dem langjährigen Mittel, im besonders sonnenscheinarmen Jahr 1987 um ca. 16 % unter dem langjährigen Mittel. Auswertungen der am Erdboden gemessenen Daten des UV-Messnetzes bestätigen

diesen Zusammenhang ([8], Lorenz et al.; Daten nicht veröffentlicht).

Die regionalen Unterschiede der UV-Belastung zwischen Nord- und Süddeutschland sind groß. Die prozentualen Änderungen des UVI und der UV-Jahresdosis wirken sich daher regional unterschiedlich aus. So liegt die UV-Jahresdosis in München auf Basis der Satellitendaten im langjährigen Mittel um 29 % über der von Sylt, was primär durch die geografische Breite (d. h. den Sonnenstand) bedingt ist ([7], Laschewski et al.; Daten nicht veröffentlicht). Inwieweit langfristige Änderungen des Aerosolgehalts der Luft in Deutschland mit Veränderungen der UV-Belastung korrespondieren, ist derzeit noch unklar. Für eine solche Auswertung sind qualitätsgesicherte Datenreihen bodengebundener Messungen notwendig.

Die dargestellten Erkenntnisse aus der Auswertung von Satellitendaten für Deutschland ([7], Laschewski et al.; Daten nicht veröffentlicht), welche für den Zeitraum 2010–2019 einen um 3 % pro Jahrzehnt höheren mittleren Wert des UVI bzw. eine um 2 % pro Jahrzehnt höhere mittlere UV-Jahresdosis im Vergleich zum Gesamtzeitraum (1983–2019) zeigen, liegen im Wertebereich der anhand von bodengebundenen Messungen für mehrere europäische Stationen ermittelten Veränderungen der UV-Strahlung [9]. In dieser Studie weisen die Messdaten der Stationen auf der geografischen Breite Deutschlands in den letzten 22 Jahren (1996–2017) Veränderungen der UV-Strahlung von -7 % bis +5 % pro Jahrzehnt auf.

Als Hauptursachen für die langfristigen Veränderungen der UV-Strahlung lassen sich an den meisten Orten außerhalb der Polarregionen Änderungen der Bewölkung, des Aerosolgehalts der Luft und des Reflexionsvermögens des Bodens identifizieren, während Veränderungen der Ozonschichtdicke weniger wichtig sind [10]. Die erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen zur Minderung der Luftverschmutzung bewirkte eine allgemeine Reduzierung des Aerosolgehalts seit etwa Mitte der 1980er-Jahre und führte auch in Deutschland zu einer höheren Strahlungsdurchlässigkeit der Atmosphäre [11]. In Folge dessen ist auch aufgrund der Reduzierung des Aerosolgehalts der Luft von einer Zunahme der bodennahen UV-Belastung auszugehen, die in urbanen Räumen besonders ausgeprägt und nicht dem Klimawandel zuzuschreiben ist.

Niedrigozonereignisse

Wie oben gezeigt wird, spielt auch in Deutschland die Entwicklung der Ozonschicht im Mittel eine deutlich geringere Rolle für die Entwicklung der UV-Belastung als Bewölkungsänderungen. Dennoch bedürfen sogenannte Niedrigozonereignisse (low ozone events, LOE) einer gesonderten Betrachtung, da sie für wenige Tage zu unerwartet hohen UV-Belastungen führen können. Es gibt verschiedene Ursachen, warum sich LOE bilden können. Zum einen kann die Wetterlage zu einem Anstieg der Höhe der Tropopause, die den Übergang von der Troposphäre zur Stratosphäre markiert, und somit zu einer (reversiblen) Verdrängung eines Teils des stratosphärischen Ozons führen. Dies bezeichnet man als LOE dynamischen Ursprungs. Zum anderen ist es möglich, dass Luftmassen aus dem arktischen Polarwirbel, in denen Ozon durch Chlorchemie irreversibel abgebaut wurde, im Frühjahr in niedrigere Breiten transportiert werden. Diese LOE chemischen Ursprungs können zwischen März und Mitte April auftreten.

Nicht alle LOE führen unmittelbar zu einer erhöhten erdbodennahen UV-Belastung, da die UV-Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre durch Wolken oder Aerosole stark verringert werden kann. Eine aktuelle Studie wertet auf der Grundlage von Satellitendaten aus dem Zeitraum 1983–2019 das Auftreten von allen LOE mit assoziierter UV-Anomalie aus, d. h. an diesen Tagen herrscht eine stärkere erdbodennahe UV-Belastung als bei wolkenlosen Bedingungen mit normaler Ozonschichtdicke zu verzeichnen wäre [12]. Diese Studie ergibt, dass die jährliche Anzahl der LOE unterschiedlichen Ursprungs durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet ist. Sie treten eher selten und nicht in jedem Jahr auf. LOE dynamischen Ursprungs können zu allen Monaten des Jahres vorkommen. Die Zeit des stärksten globalen Ozonabbaus in den 1990er-Jahren ist durch eine größere Häufigkeit von LOE gekennzeichnet. Während der letzten beiden Jahrzehnte (1998–2019) zeigt sich eine im Mittel rückläufige Anzahl aller LOE eines Jahres, wobei jedoch die Jahressummen der LOE-assoziierten Anomalien der UV-Dosis während dieses Zeitraums im Mittel unverändert sind. Insgesamt liefert der Mittelwert der Jahressummen der LOE-assoziierten Anomalien der UV-Dosis mit weniger als 1/1000 der UV-Jahresdosis einen eher geringen Beitrag. Betrachtet man die Spitzenbelastungen (LOE-assoziierte UVI-Anomalien), so ist das Frühjahr mit mehr als der Hälfte der kumulierten UV-Spitzenbelastungen die am stärksten von LOE betroffene Jahreszeit. Die Haut der meisten Menschen in Deutschland ist zu dieser Jahreszeit sonnenungewohnt und somit besonders gefährdet. Daraus ergibt sich die gesundheitliche Relevanz im Frühjahr auftretender LOE, die nicht in jedem Jahr vorkommen. Innerhalb der letzten beiden Jahrzehnte liefert der Sommer (und damit die strahlungsintensivste Zeit des Jahres) einen zunehmenden Anteil an allen LOE-assoziierten Spitzenbelastungen. Im Studienzeitraum (1983–2019) wird die stärkste LOE-assoziierte Zunahme der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke erreicht, wenn LOE nahe des Jahres-Sonnenhöchststands im Juni oder Anfang Juli auftreten; in Bezug auf die betrachteten vier Orte in Deutschland werden als Anomalie-Maximalwerte für Berlin, Frankfurt und München ca. 45 mW/m² (entsprechend 1,8 UVI) festgestellt. Primär wegen der unterschiedlichen geografischen Breite (d. h. des unterschiedlichen Sonnenstands) sind in dem ausgewerteten Zeitraum mit diesen Anomalie-Maximalwerten unterschiedliche Absolutwerte des UVI verbunden, welche von UVI 8 in Berlin bis UVI 9 in München reichten.

2.2 Erwartete Entwicklung der UV-Belastung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die möglichen zukünftigen Klimawandelentwicklungen werden mit einer Reihe von verschiedenen Szenarien modelliert. Eine Einführung in die Szenarien findet sich z. B. im einleitenden Artikel dieses Sachstandsberichts [13]. Bei Annahme des Szenarios SSP2-4.5 (Strahlungsantrieb von 4,5 W/m², der sogenannte mittlere Weg, bei dem die bisherige Entwicklung fortgeschrieben wird und Umweltsysteme eine gewisse Verschlechterung erfahren [14]) wird außerhalb der polaren Breiten eine Rückkehr zu Ozonsäulenwerten von 1980 etwa gegen 2035 für mittlere nördliche Breiten (35°N–60°N) sowie gegen 2045 für die Arktis erwartet [5]. Simulationen mit Chemieklimamodellen für den Zeitraum 1960–2100 legen aber nahe, dass Veränderun-

gen der UV-B-Strahlung in den mittleren Breiten in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts von anderen Faktoren als durch Veränderungen des globalen stratosphärischen Ozons dominiert werden könnten [15], nämlich durch einen statistisch signifikanten Rückgang der Wolkendecke um 1,4 % pro Jahrzehnt. Nach diesen Berechnungen würde die UV-B-Strahlung zwischen 2050 und 2100 voraussichtlich um 1,3 % pro Jahrzehnt zunehmen, obwohl gleichzeitig kein Trend der Ozonschichtdicke feststellbar ist. Diese Projektionen hängen kritisch von der genauen Beschreibung von Wolken durch die Klimamodelle ab und die Unsicherheiten ihrer Modellierung bewirken erhebliche Unsicherheiten auch für die projizierten Veränderungen der UV-Strahlung.

In Bezug auf Veränderungen des stratosphärischen Ozons (und in der Folge mittelbar auf LOE aufgrund polaren chemischen Ozonabbaus) begünstigt der Einfluss des Klimawandels, der zu einer Abkühlung der Stratosphäre und zu einem Anstieg des stratosphärischen Wassergehalts führt, den Ozonabbau im Frühjahr im arktischen Polarwirbel und könnte so der Erholung durch den sinkenden Chlorgehalt entgegenwirken [5, 16]. Es gibt eine sehr große Variabilität des arktischen Ozonabbaus von Jahr zu Jahr. Auf Basis bisheriger Modellierungen wird zum jetzigen Zeitpunkt erwartet, dass das Ausmaß des arktischen Ozonabbaus im Frühjahr bis Mitte des Jahrhunderts zurückgehen wird [5], wobei andere Abschätzungen einen Zeithorizont bis Ende des Jahrhunderts ableiten [16]. Die nicht in jedem Jahr auftretenden LOE über Deutschland aufgrund von polarem chemischen Ozonabbau könnten im Laufe des Jahrhunderts seltener werden, können jedoch weiterhin auftreten. Neben diesen LOE chemischen Ursprungs treten überwiegend LOE dynamischen Ursprungs auf. Es ist derzeit unklar, wie sich die Häufigkeit ihres Auftretens und die damit verbundenen UV-Belastungen entwickeln werden. Bisher sind keine Hinweise bekannt, die auf deren grundsätzliches Ausbleiben in den kommenden Jahrzehnten hindeuten würden. Einfache Extrapolationen der retrospektiven Trends würden einerseits wegen der rückläufigen Anzahl der LOE einen Rückgang der UV-Belastung erwarten lassen. Andererseits könnten ein weiterer Rückgang der Bewölkung und ein häufigeres Auftreten der LOE im Sommer eine Zunahme der UV-Belastung wahrscheinlicher machen. Weder der Nettoeffekt der gegenläufigen Trends noch die Zulässigkeit der Extrapolationen lassen sich gegenwärtig seriös abschätzen. Es besteht Forschungsbedarf.

Aufgrund erheblicher Unsicherheiten lässt sich die Entwicklung der UV-Belastung in Deutschland bis Mitte und Ende des Jahrhunderts gegenwärtig noch nicht belastbar vorhersagen.

3. Veränderung der individuellen UV-Belastung und Auswirkungen auf UV-bedingte Erkrankungen

Die zuvor beschriebenen klimawandelbedingten Veränderungen der Einflussfaktoren auf die bodennahe UV-Bestrahlungsstärke und die UV-Jahresdosis können die individuelle UV-Belastung verändern und wirken sich somit auf das direkt durch UV-Strahlung bedingte Erkrankungsrisiko aus [1, 2, 17, 18]. Indirekt bedingte Gesundheitsfolgen durch UV-Strahlung sind beispielweise die Auswirkungen erhöhten bodennahen Ozons (s. Breitner-Busch et al. [19] in diesem Sachstandsbericht) oder die negative Beeinflussung

UV-bedingte Hautkrebsinzidenzen steigen seit Jahrzehnten an.

von Neurodermitis durch UV-Strahlung (s. Bergmann et al. [20] in diesem Sachstandsbericht), auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Bei Betrachtungen des gesundheitlichen Risikos durch UV-Strahlung sind aufgrund der Tatsache, dass UV-Strahlung sofort gesundheitsrelevante Schäden verursachen kann und diese sich über das Leben hinweg aufsummieren können [1, 2], sowohl die einzelnen UV-Bestrahlungsmomente als auch die über das Leben akkumulierte UV-Dosis, die Lebenszeitdosis, zu berücksichtigen. In Bezug auf gesundheitliche Folgen einer veränderten bodennahen UV-Belastung sind entsprechend die über die letzten Jahrzehnte beobachtete Erhöhung der erdbodennahen UV-Bestrahlungsstärke [7], eine längerfristig erhöhte UV-Jahresdosis [8] und Niedrigozonereignisse [21–24] einzeln zu betrachten.

Zur Beschreibung des UV-bedingten Krankheitsgeschehens wird der UV-bedingte Hautkrebs (Infobox 1) herangezogen, da es hierzu Daten gibt, die eine Quantifizierung der Krankheitsgeschehens erlauben.

Weltweit wird seit Jahrzehnten eine ansteigende Hautkrebsinzidenz verzeichnet. In Deutschland hat sich die Inzidenz für den hellen Hautkrebs in den letzten 30 Jahren vervierfacht (Männer) bis verfünffacht (Frauen) [2, 25]. Für den schwarzen Hautkrebs hat sich die Inzidenz seit den 1970er-Jahren etwa vervierfacht [2, 25]. Seit 2012 ist die Erkrankungsrate für den schwarzen Hautkrebs bei Frauen leicht rückläufig und bei Männern etwa konstant geblieben [26]. Derzeit erkranken entsprechend den Hochrechnungen aus den Daten des Hautkrebsregisters Schleswig-Holstein, die im Gegensatz zu den Daten des Robert Koch-Instituts auch in-situ Melanome und in-situ

Infobox 1
Hautkrebs

Man unterscheidet beim Hautkrebs den sogenannten hellen oder weißen Hautkrebs vom schwarzen Hautkrebs. Zum hellen Hautkrebs zählen das Basalzellkarzinom (Basaliom) und das Plattenepithelkarzinom (Spinaliom oder auch Stachelzellkrebs). Beim hellen Hautkrebs vermehren sich melaninlose Hautzellen (Melanin = farbgebendes Pigment der Haut und der Haare) unkontrolliert. Dem hellen Hautkrebs können Hautveränderungen vorausgehen, die sogenannten Präkanzerosen, wie die aktinische Keratose oder der Morbus Bowen. Der schwarze Hautkrebs wird als malignes Melanom bzw. Melanom bezeichnet. Hier entarten melaninhaltige Hautzellen. Sowohl das Plattenepithelkarzinom, als auch das Melanom können streuen und Metastasen bilden.

Plattenepithelkarzinom beinhalten, rund 300.000 Menschen pro Jahr neu an Hautkrebs [27]. Die Krankenhausbehandlungen UV-bedingter Hautkrebserkrankungen stiegen zwischen 2001 und 2021 um 75 %, die Todesfälle mit rund 4.100 Verstorbenen in 2021 im selben Zeitraum um 55 % [28]. Zwischen 2001 und 2021 sind rund 72.000 Menschen in Deutschland aufgrund von Hautkrebs (Melanom und sonstige bösartige Neubildungen der Haut) gestorben [29].

Modellrechnungen entsprechend könnte ein um 1 % verringertes stratosphärisches Ozon einen Anstieg der Inzidenz für den schwarzen Hautkrebs (Melanom) um 1–2 % [30, 31], für das Plattenepithelkarzinom um 3–4,6 % und für das Basalzellkarzinom um 2,7 % bedeuten [32–34]. Bei dem über Deutschland eingetretenen Abbau um 3 % würde das rein theoretisch einen geschätzten Anstieg für den schwarzen Hautkrebs (Melanom) um 3–6 %, für das Plattenepithelkarzinom um 9–15 % und für das Basalzellkarzinom um 9 % bedeuten. Bei Annahme der vollständi-

Die Auswirkung der Klimawandel-beeinflussten Veränderungen auf das individuelle Hautkrebserkrankungsrisiko lässt sich derzeit nur mit erheblichen Unsicherheiten vorhersagen.

gen Einhaltung des Montrealer Protokolls und unter Berücksichtigung des Hauttyps ergaben Modellierungen, dass aufgrund stratosphärischen Ozonverlusts bis zum Ende des 21. Jahrhunderts für Westeuropa mit drei bis vier zusätzlichen Hautkrebsfällen pro 100.000 Einwohner und Jahr zu rechnen ist [35]. Das wären in Deutschland bei einer Einwohnerzahl von rund 83 Millionen etwa 2.500 bis 3.300 zusätzliche Hautkrebsfälle pro Jahr.

Die in Deutschland beobachteten Niedrigozonereignisse führen zu unerwartet hohen UV-Bestrahlungsstärken, welche insbesondere im Frühjahr nicht erwartet und Sonnenschutzmaßnahmen entsprechend nicht bedacht werden. Ein damit verbundenes höheres Risiko für Sonnenbrände und in der Folge für Hautkrebserkrankungen kann angenommen werden. Eine Quantifizierung ist jedoch auch aufgrund einer fehlenden Beschreibung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung von individueller UV-Dosis und Hautkrebserkrankungsgeschehen derzeit nicht möglich. Ebensolches gilt für die Quantifizierung der gesundheitlichen Konsequenzen einer erhöhten UV-Jahresdosis in sonnenreichen Jahren.

Die mit dem Klimawandel einhergehende Temperaturerhöhung wird ebenfalls als Einflussfaktor auf das Hautkrebsgeschehen diskutiert. Studien zeigen, dass Hitzestress den programmierten Zelltod UV-geschädigter Zellen hemmen kann und sich bei einer Temperaturerhöhung um 2 °C die Inzidenz für den hellen Hautkrebs um etwa 11 % erhöhen könnte [36–38]. Die bisherigen Studien zur Auswirkung höherer Temperaturen auf die Entstehung von UV-bedingtem Hautkrebs lassen Fragen offen, so dass es zur Klärung und zur Festigung der Erkenntnisse weiterer Untersuchungen bedarf [2].

Die in der Literatur zu findenden Abschätzungen der Inzidenzerhöhung betrachten nicht das Verhalten der Menschen, sich im Freien aufzuhalten – also der Art, wie lange man sich welchen UV-Bestrahlungsstärken unter Anwendung welcher UV-Schutzmaßnahmen aussetzt. Dieses sogenannte UV-Expositionsmuster ist aber ein wesentlicher Risikofaktor für Hautkrebserkrankungen [2]. Sonnenbrände als Konsequenz einer zu intensiven UV-Bestrahlung beispielsweise verdoppeln das Risiko, an schwarzem Hautkrebs zu erkranken – bei Kindern wird von einer Verdreifachung gesprochen [2, 4].

Klimawandelbedingte Veränderungen im menschlichen Sonnenexpositionsverhalten können einen wichtigen Einfluss auf zukünftige Gesundheitsrisiken durch UV-Strahlung haben. Bisher veröffentlichte wissenschaftliche Untersuchungen stützen die Theorie, dass Menschen sich bei angenehmen Wetterverhältnissen und Temperaturen häufiger und leicht bekleidet im Freien aufhalten und so insbesondere bei geringer Bewölkung (Strahlungswetterlage) ihre individuelle UV-Belastung erhöhen. In einer aktuellen Übersichtsarbeit werden die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu klimabedingten Veränderungen im menschlichen Sonnenexpositionsverhalten zusammengefasst [39]. Demnach bestehen insbesondere bei Freizeitaktivitäten und bei der aktiven Freizeitmobilität mehr Möglichkeiten, sich wetterabhängig zu verhalten, als bei Routinetätigkeiten, auch wenn die Richtung und das Ausmaß der Auswirkungen variieren. Es zeigt sich zudem, dass es ist nicht gerechtfertigt ist, Ergebnisse und Schlussfolgerungen zwischen unterschiedlichen Klimazonen und Jahreszeiten zu übertragen und zwischen verschiedenen Freizeitaktivitäten und Formen aktiver Mobilität zu verallge-

Das richtige UV-Schutz-Verhalten zu erlernen und auszuüben beginnt von klein auf und ist bis ins hohe Alter eine Notwendigkeit.

meinern. Außerdem ist zu beachten, dass sich Verhaltensänderungen je nach individuellen Merkmalen des Menschen wie Wärmeaffinität, Freizeittyp, Alter und Geschlecht unterschiedlich entwickeln können. Für ein gemäßigtes Klima, wie es in Deutschland herrscht, liefern die vorliegenden Studien Hinweise darauf, dass eine mögliche Erhöhung der UV-Exposition in erster Linie aus einer Reduzierung der Kleidung und erst in zweiter Linie aus einer veränderten Aufenthaltsdauer im Freien resultieren würde. Bei starker Wärmebelastung besteht die Tendenz, Aufenthalte im Freien oder in der Sonne zu vermeiden. Für Deutschland lassen die Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eine deutliche Zunahme der Temperatur, der Anzahl der sogenannten „Sommertage“ (Temperaturmaximum mindestens 25 °C) und der „Heißen Tage“ (Temperaturmaximum mindestens 30 °C) gegenüber dem Referenzzeitraum 1961–1990 erkennen [40]. Zur Temperaturentwicklung und der Hitzeproblematik in Deutschland gibt ein weiterer Beitrag dieses Sachstandsberichts von Winklmayr et al. [41] ausführliche Informationen. Letztendlich sind aber zum jetzigen Zeitpunkt keine quantitativen Aussagen über die aus dem wetterabhängigen Verhalten resultierende individuelle UV-Belastung möglich [2, 39].

4. Handlungsempfehlungen zur Senkung des Risikos für UV-bedingte Gesundheitsschädigungen

Eine deutschlandweite, zielgruppenorientierte und nachhaltige Etablierung geeigneter Maßnahmen ist aufgrund der bestehenden Situation mit hoher und aktuell weiter steigender Anzahl UV-bedingter Erkrankungen in Deutschland und der damit einhergehenden Belastung des Gesundheitswesens und des Allgemeinwohls dringend geboten [2, 4, 42]. Hinzu kommt der Einfluss des Klimawandels. Im Rahmen der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 wurde für die Klimawirkung UV-bedingte Gesundheitsschädigungen ein mittleres bis hohes Klimarisiko mit mittlerer Gewissheit für die Zeit bis 2060 und ein insbesondere wegen des langen zeitlichen Vorlaufs sehr dringendes Handlungserfordernis attestiert [43]. Anpassungsstrategien an die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels sollen dementsprechend Präventionsmaßnahmen zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen im Fokus haben [2]. Dabei ist zu betonen, dass diese Maßnahmen nicht bedeuten, UV-Strahlung und damit die Sonne komplett zu meiden. Es geht darum, die Voraussetzungen für einen bewussten Umgang mit Sonne und UV-Strahlung zu schaffen und einen lebbaren UV-Schutz zu ermöglichen.

Geeignete Maßnahmen sind primärpräventive Maßnahmen zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen [2]. Primärprävention umfasst Maßnahmen, die zum einen ein risikobewusstes und gesundheitsorientiertes Verhalten fördern (Verhaltensprävention) und zum anderen die Lebens-, Arbeits- und Umweltbedingungen der Menschen derart gestalten, dass hohe UV-Belastungen weitgehend vermieden werden können (Verhältnisprävention). Verhaltenspräventive und verhältnispräventive Maßnahmen haben dabei sinnvoll ineinander zu greifen [44].

Das Risiko für UV-bedingte Erkrankungen wirkungsvoll zu senken, ist eine gesellschaftspolitische Aufgabe und umfasst vorbeugende Maßnahmen von Geburt an. Vor allem ein wirkungsvoller Schutz der Kinder ist geboten, da Kinder eine gegenüber Erwachsenen deutlich höhere Empfindlichkeit der Augen und der Haut für UV-Strahlung aufweisen [1].

Maßnahmen zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen bergen Synergieeffekte zum Hitzeschutz.

Einige Maßnahmen, wie zum Beispiel die Schaffung effektiver Schattenplätze, können gleichzeitig zur Vorbeugung gesundheitsschädlicher Hitzebelastungen im Freien dienen [45]. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass gesundheitsrelevante UV-Bestrahlungsstärken auch dann herrschen können, wenn das Aufsuchen von Schatten unnötig ist, z. B. wenn es kühl ist oder der Himmel bewölkt ist. Darum könnte es beispielweise an Orten, die allgemein eher kühl sind und an denen sich Kinder wie Erwachsene länger aufhalten (Freigelände in Kindergärten und Schulen, Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrs, etc.), angebracht sein, Überdachungen mit Materialien wie Polycarbonat zu errichten, die die UV-Strahlung, aber nicht die Wärme abhalten. Bei Beschattungsmaßnahmen ist zu beachten, dass die sonnenschützende Wirkung durch Größe, Form und Position der schattenspendenden Struktur sowie durch die Umgebung und die Wetterbedingungen beeinflusst wird [46]. Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Beschattung von Außenbereichen die Nutzung des Schattens erhöhen kann [2]. Bei Nutzung von Pflanzungen zur Schattengenerierung sind allergieauslösende Begrünungen zu vermeiden [43].

Eine wichtige Maßnahme neben der Schaffung von Schattenplätzen und dem gesicherten UV-Schutz für Kinder ist, die herrschende UV-Bestrahlungsstärke öffentlich anzuzeigen, denn UV-Strahlung ist für den Menschen nicht wahrnehmbar und entsprechende Fehleinschätzungen des UV-bedingten Gesundheitsrisikos sind allgegenwärtig. Die sonnenbrandwirksame UV-Bestrahlungsstärke wird vom Bundesamt für Strahlenschutz gemessen bzw. vom Deutschen Wetterdienst modelliert und als UV-Index, ein weltweit einheitliches Maß, veröffentlicht [47, 48]. Die UVI-Werte sind in Bereiche unterteilt, für die unterschiedliche Schutzempfehlungen gelten. Der UVI ist somit nicht nur eine Orientierungshilfe für die zu erwartende sonnenbrandwirksame UV-Bestrahlungsstärke, sondern gibt auch Empfehlungen, ab welchen UVI-Werten welche Sonnenschutzmaßnahmen ergriffen werden sollten.

Handlungsempfehlungen richten sich mit Blick auf Surveillance und Implikationen für ein resilientes Public-Health-System an Wissenschaft und Politik (Bund/Länder). Im Hinblick auf deren wirkungsvolle Etablierung und Umsetzung sind weitere Akteurinnen und Akteure mit einzubinden [42]. Die in Tabelle 1 aufgeführten Handlungsempfehlungen sind den Empfehlungen der onkologischen S3-Leitlinie „Prävention von Hautkrebs“ [2] und der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021, Teilbericht 5 [43] entsprechend formuliert und um weiterführende Hinweise sowie um konkrete Maßnahmen für Kommunen ergänzt. Ihre Reihenfolge stellt keine Gewichtung bzgl. Effektivität oder Dringlichkeit dar. Ausführliche Informationen zu den empfohlenen Maßnahmen sind, wenn nicht anders angegeben, der S3-Leitlinie zu entnehmen.

Für eine effektive Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen bedarf es auch der Akzeptanz und Motivation. Grundlage hierfür bietet zum einen, dass medizinische, wissenschaftliche und behördliche Institutionen umfassende Informationen bezüglich UV-Strahlung, Wirkung von UV-Strahlung, Schutz vor UV-Strahlung, Präventionsmaßnahmen und UV-Schutz als Klimaanpassungsmaßnahme zur Verfügung stellen. Zum anderen werden Fördermittel bereitgestellt (Infobox 2).

Tabelle 1
Handlungsempfehlungen für Wissenschaft und Politik zur Reduzierung der UV-Belastung und zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen
Quelle: Eigene Darstellung nach S3-Leitlinie [2] und Klimawirkungs- und Risikoanalyse [43]

Handlungsebene	Handlungsempfehlungen
Wissenschaft	▶ Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels (Treibhausgase – Ozonschicht – Niedrigozonereignisse, Bewölkung und Aerosole) auf die UV-Belastung ▶ Wissenschaftliche Auswertungen und Analyse der aktuellen und der in den letzten Jahrzehnten in Deutschland gemessenen UV-Bestrahlungsstärken ▶ Entwicklung geeigneter Indikatoren für UV-Monitoring ▶ Erarbeitung von Projektionen der UV-Strahlungssituation für Deutschland/Europa in Bezug auf die für mögliche zukünftige Klimawandelentwicklungen modellierten Szenarien unter Berücksichtigung der Bewölkung, der Aerosolkonzentration und des Rückstrahlvermögens (Albedo) ▶ Weiterführende Forschung zu Langzeitwirkung der UV-Strahlung auf die Augen ▶ Etablierung von Registrierungsverfahren anderer UV-bedingter Erkrankungen als Hautkrebs und Optimierung bestehender Registrierungsverfahren für alle Hautkrebsentitäten ▶ Beschreibung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung UV-Strahlung/Hautkrebs ▶ Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf die Wirkungen von UV-Strahlung ▶ Untersuchung einer möglicherweise kombinierten gesundheitlichen Wirkung von UV-Strahlung, Luftschadstoffen und meteorologischen Faktoren ▶ Quantifizierung wetterabhängiger Verhaltensgewohnheiten und Klärung des Einflusses klimawandelbedingter Wetter- und Temperaturveränderungen auf Verhaltensgewohnheiten und individuelle UV-Belastung ▶ Evaluierung der Umsetzung und Wirksamkeit von Handlungsempfehlungen und Präventionsmaßnahmen ▶ Entwicklung von Geoinformationssystem (GIS)-basierten Modellierungsprogrammen zur Visualisierung der UV-Belastung für Stadt- und Gebäudeplanung sowie Landschaftsarchitektur zur Schaffung sinnvoll UV-reduzierter Außenbereiche
Arbeitsschutz	▶ Prüfung, Evaluation und Optimierung bestehender Vorschriften und staatlicher Regeln zum Arbeitsschutz (Schutz vor arbeitsbedingten Gefährdungen durch UV-Strahlung [49]) und zur Arbeitsmedizin (Vorsorgeuntersuchung für Berufskrankheit BK 5103) gemäß der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) [50]
Bevölkerungsschutz Verhaltenspräventive Maßnahmen	▶ Finanzielle Förderung der flächendeckenden Etablierung verhaltenspräventiver Maßnahmen ▶ Pädagogisch begleitete Information und Aufklärung über UV-Schutzmaßnahmen (z. B. [51]) und deren Notwendigkeit von Kindern und Jugendlichen in Kita und Schule unter Einbeziehung der Eltern. Beispiele: „Clever in Sonne und Schatten“ [52], SunPass-Projekt [53] ▶ Iterative, multimediale, interaktiv gestaltete, sich aus mehreren Komponenten zusammensetzende und mehrere Kommunikationskanäle nutzende Interventionen für Jugendliche ▶ Individualisierte Interventionen wie beispielsweise im Rahmen von ärztlichen Beratungsgesprächen für Jugendliche und Erwachsene ▶ Integration des Themas „Schutz vor UV-Strahlung“ in Lehr-, Erziehungs- und Bildungspläne der frühkindlichen Erziehung und des Schulunterrichts auf Basis eines Grundlagenkatalogs sowie in Lehr-, Studien- und Ausbildungspläne und Weiter- und Fortbildungen anzusprechender Berufsbilder ▶ Entwicklung, Evaluation und Optimierung von Informations- und Schulungsangeboten ▶ Erstellen und bedarfsorientierte Verbreitung von zielgruppenorientierten Informationsmaterialien für vulnerable Bevölkerungsgruppen ▶ Unterstützung der Aktivitäten von Fortbildungseinrichtungen bei Konzeption von Weiterbildungsmaßnahmen im Sozial-, Gesundheits- und Pflegebereich

Tabelle 1 *Fortsetzung nächste Seite*

Handlungsebene	Handlungsempfehlungen
Bevölkerungsschutz Verhältnispräventive Maßnahmen Bund-Länderebene	▶ Politische und programmatische Verankerung verhaltens- und verhältnispräventiver Maßnahmen zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen. Die gesetzlichen Voraussetzungen hierfür sind durch das Präventionsgesetz, das Krebsfrüherkennungs- und -registergesetz, das Patientenrechtegesetz, ergänzt durch eine gesetzliche Verpflichtung aus dem Baugesetzbuch (§ 1, Abs. 6, Nr. 1 und 7c; Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sowie der umweltbezogenen Auswirkungen auf den Menschen und seine Gesundheit) gegeben. ▶ Aufnahme verhältnispräventiver Maßnahmen zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen in den Lebenswelten der Menschen in Förderprogramme für Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels und Städtebauförderung ▶ Berücksichtigung der UV-Strahlung als gesundheitsrelevanter Umweltfaktor bei Einrichtung eines integrierten Umwelt- und Gesundheitsbeobachtungssystems auf Bundesebene ▶ Etablierung präventiver Maßnahmen zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen im Rahmen von Hitzeaktionsplänen [54] ▶ Integration von UV-Belastung in Frühwarnsysteme (z. B. Hitzewarnsystem) ▶ Informationen zu Eigenschaften verschiedener Baumarten und zu Standortfaktoren hinsichtlich Schatten und Transpirationsprozessen für die effektive Reduzierung der Wärme- und UV-Belastung ▶ Förderung der flächendeckenden Etablierung verhältnispräventiver Maßnahmen auf kommunaler Ebene

Bevölkerungsschutz
Verhältnispräventive Maßnahmen Kommunen
	▶ Eruieren und Etablieren von Schnittstellen und Andockpunkten für Verhältnispräventionsmaßnahmen zur Reduzierung der UV-Belastung im Freien bei (Planungs-)Prozessen für Städtebau, Stadt- und Gebäudeplanung. Einbettung gebietsbezogener Aktivitäten zur Reduzierung gesundheitsrelevanter UV-Belastungen in eine gebietsübergreifende Entwicklungspolitik
	▶ Aufnahme verhältnispräventiver Maßnahmen inklusive der Forderung nach Umsetzung in kommunale Ausschreibungen für Städtebau, Stadt- und Gebäudeplanung sowie Landschaftsbau (Neubauten, Sanierungsmaßnahmen bestehender Freiflächen und Gebäude)
	▶ Die Förderung und die kommunenseitige Umsetzung folgender Maßnahmen werden empfohlen:
	  ▶ Anzeige des UV-Index im öffentlichen Raum (Freibäder, Badestellen, Stadtplätze, etc.)
	  ▶ Schaffung von Schattenplätzen mittels baulich-technischer Maßnahmen (Überdachungen, Sonnensegel, Sonnenschirme, Markisen, etc.) [55] sowie Baumpflanzung (s. hierzu die Straßenbaumliste der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz e. V. [56]) in der Kommune, in Wartezonen des öffentlichen Nahverkehrs sowie in Kitas und Schulen
	  ▶ Verwendung nicht reflektierender Oberflächen für Gebäudewände zur Reduzierung des Rückstrahlvermögens (Albedo)
	  ▶ Aufbau von Fassadenbegrünung (s. hierzu Publikation des Bundesamts für Naturschutz [57])
	  ▶ Entsiegelung und Begrünung von Freiflächen

Tabelle 1 *Fortsetzung*
Handlungsempfehlungen für Wissenschaft und Politik zur Reduzierung der UV-Belastung und zur Vorbeugung UV-bedingter Erkrankungen
Quelle: Eigene Darstellung nach S3-Leitlinie [2] und Klimawirkungs- und Risikoanalyse [43]

5. Diskussion und Fazit

Die als erforderlich angesehenen wissenschaftlichen Maßnahmen stellen eine große Herausforderung dar – vor allem die Beschreibung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung UV-Strahlung/Hautkrebs und die Projektion der zukünftigen erdbodennahen UV-Belastung. Sowohl die Dosis-Wirkungs-Beziehung als auch die UV-Projektion sind für eine verlässliche Abschätzung der Auswirkungen zukünftiger klimawandelbedingter Veränderungen der UV-Belastung von großer Bedeutung.

Die hinsichtlich Arbeits- und Bevölkerungsschutz empfohlenen Maßnahmen zur Verringerung der individuellen UV-Belastung befinden sich bereits teilweise in Umsetzung. Treibende Kraft ist hier die Tatsache, dass 2015 aufgrund der eindeutigen Assoziation mit beruflicher UV-Belastung die helle Hautkrebsentität, das Plattenepithelkarzinom, und seine Vorstufen, die aktinischen Keratosen, als Berufskrank-

heit eingestuft wurde [58]. Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer mit Außentätigkeiten haben auch ein erhöhtes Risiko für Basalzellkarzinome [59]. Arbeitgeberinnen und Arbeitgeber sind entsprechend zu einer Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten im Freien verpflichtet, müssen erforderlichenfalls geeignete Schutzmaßnahmen [60] ergreifen und diese dokumentieren. Dies gilt für die in Deutschland etwa 2 bis 3 Millionen Beschäftigten, die vorwiegend oder ausschließlich im Freien tätig sind [61], als auch für die über die Unfallversicherungen versicherten Kinder in Kindertagesstätten und Schulen.

Für eine effektive Reduzierung der UV-Belastung aller sind vor allem die auf Kommunalebene empfohlenen Maßnahmen ausschlaggebend, die auch im Zusammenhang mit Handlungsempfehlungen in anderen Artikeln dieses Sachstandsberichts zu sehen sind, insbesondere denjenigen zu Hitze von Winklmayr et al. [41]. Bestenfalls entsprechen oder ergänzen sich die empfohlenen Maßnahmen. In Bezug auf die Empfehlungen zur Anpassung an Hitze zeigt sich jedoch ein Widerspruch: Für den Schutz vor UV-Strahlung sollten Oberflächen von Gebäuden eine möglichst geringe bis keine Albedo aufweisen [2], aber zur Hitzereduzierung in Innenräumen wird empfohlen, das Rückstrahlvermögen (Albedo) von Gebäudeaußenflächen zu erhöhen [43]. Die Empfehlung für eine geringe Albedo begründet sich darin, dass aufgrund von Rückstrahlung die UV-Belastung in der Nähe solcher Gebäude intensiviert werden kann. Eine reduzierte Oberflächenalbedo wäre auch in Bezug auf den Hitzeschutz positiv, denn auch die Temperatur kann sich aufgrund eines hohen Rückstrahlvermögens von Gebäudeaußenflächen in der Nähe dieser Gebäude erhöhen. Eine Lösung dieses Widerspruchs wäre, eine effektive Hitzereduktion in Innenräumen mittels einer entsprechenden Gebäudedämmung und Belüftung zu erreichen.

Infobox 2
Informationsangebote, Empfehlungen und Förderungen für einen wirkungsvollen UV-Schutz in Deutschland

- Strahlenschutzkommission
- Leitlinienprogramm Onkologie (Deutsche Krebsgesellschaft, Deutsche Krebshilfe, AWMF): S3-Leitlinie „Prävention von Hautkrebs“
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Hintergrundinformationen und Unterrichtsmaterialien zu UV-Strahlung, UV-Strahlung und Klimawandel, UV-Index, Wirkung von und Schutz vor UV-Strahlung sowie zur UV-Kampagne „UV-sicher“ mit Maßnahmepaketen für Kommunen, Kindergärten, Schulen und Sportvereinen
- Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BZgA): Kindergesundheit – Sonnenschutz für Kinder und Klima-Mensch-Gesundheit (Webseite der BZgA, u. a. auch zu UV-Strahlung und UV-Schutz (2022))
- Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) für Deutschland 2021, Teilbericht 5, Cluster „Gesundheit“, Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschäden“
- Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen inklusive Thematisierung UV-Strahlung
- Stiftung Deutsche Krebshilfe informiert eingehend auf ihren Internetseiten über UV-Strahlung und Hautkrebs
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung und Landesunfallkassen
- Förderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) insbesondere für Kommunen und kommunale Einrichtungen sowie in sozialen Einrichtungen

Diese Zusammenstellung ist eine Auswahl und hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Allein aufgrund der stetig steigenden UV-bedingten Hautkrebsinzidenzen ist es geboten, jetzt zu handeln, zumal die Etablierung effektiver Präventionsmaßnahmen Jahre in Anspruch nimmt.

Die verhaltens- und verhältnispräventiven Maßnahmen zur Vorbeugung des UV-bedingten Erkrankungsrisikos sind einfach umzusetzen, können jedoch kostenintensiv sein. International werden derartige Maßnahmen aus gesundheitsökonomischer Sicht positiv bewertet, da entsprechende Analysen eindeutig einen hohen ökonomischen und gesundheitsbezogenen Nutzen zeigten. Durch die Investition können das Gesundheitssystem besonders stark belastende Hautkrebserkrankungen und Todesfälle deutlich reduziert werden und im Gesundheitssektor wie auch in der Wirtschaft, hier aufgrund verhüteter Produktivitätsverluste, das Doppelte bis Vierfache der in Präventionsmaßnahmen investierten Kosten eingespart werden [2].

Die Integration präventiver Maßnahmen in Kommunen inklusive Kindertagesstätten, Schulen und Vereinen erfordert einen multidisziplinären Ansatz. Eine auf Kommunalebene etablierte Beschattungspolitik wird empfohlen [46].

Korrespondenzadresse
Dr. Cornelia Baldermann
Bundesamt für Strahlenschutz
Fachgebiet WR4 – Optische Strahlung
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Oberschleißheim
E-Mail: cbaldermann@bfs.de

Zitierweise
Baldermann C, Laschewski G, Grooß JU (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch veränderte UV-Strahlung. J Health Monit 8(S4): 61–81.
DOI 10.25646/11647

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter: www.rki.de/jhealthmonit-en

Datenschutz und Ethik

Bei Erstellung der im Beitrag erwähnten nicht publizierten Studienergebnisse wurden weder datenschutzrelevante noch ethische Aspekte berührt, da es sich nicht um Studien handelt, an denen Teilnehmerinnen und Teilnehmer beteiligt waren.

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021 – 06/2024).

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und der Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Danksagung

Die Autorinnen und der Autor dieses Berichts danken Daniela Weiskopf, Sebastian Lorenz und Andreas Matzarakis für die fachliche Unterstützung. Das RKI-Koordinationsteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Strahlenschutzkommission (SSK) (2016) Schutz des Menschen vor den Gefahren solarer UV-Strahlung und UV-Strahlung in Solarien. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. SSK, Bonn. www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2016/2016-02-11_Empf_UV-Schutz%20BA.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 03.07.2023)
2. Leitlinienprogramm Onkologie (2021). Leitlinienreport der S3-Leitlinie Prävention von Hautkrebs, Langversion 2.0. Deutsche Krebsgesellschaft, Deutsche Krebshilfe, Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaft e.V. www.leitlinienprogramm-onkologie.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Leitlinien/Hautkrebspraeventationsleitlinie_1.1/Version_2/LL_Pr%C3%A4vention_von_Hautkrebs_Leitlinienreport_2.0.pdf (Stand: 03.07.2023)
3. El Ghissassi F, Baan R, Straif K et al. (2009) A review of human carcinogens – Part D: Radiation. Lancet Oncol 10(8):751–752
4. Leitlinienprogramm Onkologie (2014) S3-Leitlinie Prävention von Hautkrebs, Langversion 1.1. Deutsche Krebsgesellschaft, Deutsche Krebshilfe, Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaft e.V. www.leitlinienprogramm-onkologie.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Leitlinien/Hautkrebspraeventationsleitlinie_1.1/LL_PraeventionHK_OL_Langversion_1.1.pdf (Stand: 03.07.2023)
5. World Meteorological Organization (WMO) (2022) Scientific assessment of ozone depletion: 2022. WMO, Geneva. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22231 (Stand: 03.07.2023)
6. World Health Organization (WHO), World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2022) Global solar UV index: A practical guide. WHO, Geneva. https://apps.who.int/iris/handle/10665/42459 (Stand: 03.07.2023)
7. Vitt R, Laschewski G, Bais AF et al. (2020) UV-Index climatology for Europe based on satellite data. Atmosphere 11(7):727
8. Baldermann C, Lorenz S (2019) UV-Strahlung in Deutschland: Einflüsse des Ozonabbaus und des Klimawandels sowie Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung. Bundesgesundheitsbl 62(5):639–645
9. Fountoulakis I, Diémoz H, Siani AM et al. (2019) Solar UV irradiance in a changing climate: Trends in Europe and the significance of spectral monitoring in Italy. Environments 7(1):1
10. Neale RE, Barnes PW, Robson TM et al. (2021) Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, Update 2020. Photochem Photobiol Sci. 20(1):1–67
11. Wild M, Wacker S, Yang S et al. (2021) Evidence for clear-sky dimming and brightening in Central Europe. Geophys Res Lett 48(6):e2020GL092216
12. Laschewski G, Matzarakis A (2023) Long-term changes of positive anomalies of erythema-effective UV irradiance associated with low ozone events in Germany 1983–2019. Environments 10(2):31
13. Hertig E, Hunger I, Kaspar-Ott I et al (2023) Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023. J Health Monit 8(S3):7–35. https://edoc.rki.de/handle/176904/11074 (Stand: 28.06.2023)
14. Kreienkamp F, Früh B, Kotlarski S et al. (Hrsg) (2022) Empfehlungen für die Charakterisierung ausgewählter IPCC Klimaszenarien. Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse, Landesamt für Umwelt Brandenburg, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Umweltbundesamt, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/szenariennamen-stand_20220315.pdf (Stand: 30.06.2023)
15. Eleftheratos K, Kapsomenakis J, Zerefos CS et al. (2020) Possible effects of greenhouse gases to ozone profiles and DNA active UV-B irradiance at ground level. Atmosphere 11(3):228
16. von der Gathen P, Kivi R, Wohltmann I et al. (2021) Climate change favours large seasonal loss of Arctic ozone. Nat Commun 12(1):3886
17. Augustin J, Sauerborn R, Burkart K et al. (2017) Gesundheit. In: Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg) Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer, Berlin, Heidelberg. S. 137–149

18. Bais AF, Lucas RM, Bornman JF et al. (2018) Environmental effects of ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2017. Photochem Photobiol Sci 17(2):127–179

19. Breitner-Busch S, Mücke HG, Schneider A et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft. J Health Monit 8(S4):111–131. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

20. Bergmann KC, Brehler R, Endler C et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Deutschland. J Health Monit 8(S4):82–110. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

21. Brönnimann S, Hood LL (2003) Frequency of low-ozone events over northwestern Europe in 1952–1963 and 1990–2000. Geophys Res Lett 30(21)

22. Knudsen BM, Jønch-Sørensen H, Eriksen P et al. (2005) UV radiation below an Arctic vortex with severe ozone depletion. Atmos Chem Phys 5(11):2981–2987

23. Manney GL, Livesey NJ, Santee ML et al. (2020) Record-low Arctic stratospheric ozone in 2020: MLS observations of chemical processes and comparisons with previous extreme winters. Geophys Res Lett 47(16):e2020GL089063

24. National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020) NASA reports Arctic stratospheric ozone depletion hit record low in March. www.nasa.gov/feature/goddard/2020/nasa-reports-arctic-stratospheric-ozone-depletion-hit-record-low-in-march (Stand: 30.06.2023)

25. Zentrum für Krebsregisterdaten im Robert Koch-Institut (2022) Datenbankabfrage mit Schätzung der Inzidenz, Prävalenz und des Überlebens von Krebs in Deutschland auf Basis der epidemiologischen Landeskrebsregisterdaten 2022. www.krebsdaten.de/abfrage (Stand: 04.07.2023)

26. Zentrum für Krebsregisterdaten im Robert Koch-Institut (2022) Malignes Melanom der Haut. www.krebsdaten.de/melanom (Stand: 04.07.2023)

27. Katalinic A (2022) Update – Prognose und Zahlen zu Hautkrebs in Deutschland. Institut für Krebsepidemiologie e.V., Gesellschaft der epidemiologischen Krebsregister in Deutschland e.V. www.krebsregister-sh.de/wp-content/uploads/2022/04/Zahlen_Hautkrebs_2022-1.pdf (Stand: 30.06.2023)

28. Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023) Zahl der stationären Hautkrebsbehandlungen binnen 20 Jahren um 75 % gestiegen. Pressemitteilung vom 23.05.2023. www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2023/PD23_21_p002.html (Stand: 30.06.2023)

29. Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023) Todesursachenstatistik – Todesursachen: Melanom und sonstige bösartige Neubildungen der Haut. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online (Stand: 14.07.2023)

30. Lautenschlager S, Wulf HC, Pittelkow MR (2007) Photoprotection. Lancet 370(9586):528–37

31. Garland CF, Garland FC, Gorham ED (2003) Epidemiologic evidence for different roles of ultraviolet A and B radiation in melanoma mortality rates. Ann Epidemiol 13(6):395–404

32. Lopez Figueroa F (2011) Climate change and the thinning of the ozone layer: Implications for dermatology. Actas Dermosifiliogr 102:311–315

33. de Gruijl FR, Longstreth J, Norval M et al. (2003) Health effects from stratospheric ozone depletion and interactions with climate change. Photochem Photobiol Sci 2(1):16–28

34. Armstrong BK (1994) Stratospheric ozone and health. Int J Epidemiol 23(5):873–885

35. van Dijk A, Slaper H, den Outer PN et al. (2013) Skin cancer risks avoided by the Montreal Protocol – Worldwide modeling integrating coupled climate-chemistry models with a risk model for UV. Photochem Photobiol 89(1):234–246

36. van der Leun J, de Gruijl F (2002) Climate change and skin cancer. Photochem Photobiol Sci 1(5):324–326

37. van der Leun JC, Piacentini RD, de Gruijl FR (2008) Climate change and human skin cancer. Photochem Photobiol Sci 7(6):730–733

38. Calapre L, Gray ES, Kurdykowski S et al. (2016) Heat-mediated reduction of apoptosis in UVB-damaged keratinocytes in vitro and in human skin ex vivo. BMC Dermatol 16(1):6

39. Laschewski G, Matzarakis A (2022) Weather-related human outdoor behavior with respect to solar ultraviolet radiation exposure in a changing climate. Atmosphere 13(8):1183

40. Deutscher Wetterdienst (2023) Zeitreihen und Trends. www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html (Stand: 30.06.2023)

41. Winklmayr C, Matthies-Wiesler F, Muthers S et al. (2023) Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. J Health Monit 8(S4):3–34. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

42. UV-Schutz-Bündnis, Bundesamt für Strahlenschutz (2017) Vorbeugung gesundheitlicher Schäden durch die Sonne – Verhältnisprävention in der Stadt und auf dem Land: Grundsatzpapier des UV-Schutz-Bündnisses. Bundesgesundheitsbl 60(10):1153–1160

43. Wolf M, Ölmez C, Schönthaler K et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021, Teilbericht 5: Klimarisiken in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. Umweltbundesamt (Hrsg) Climate Change 24/2021. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_5_cluster_wirtschaft_gesundheit_bf_211027_0.pdf (Stand: 28.06.2023)

44. Baldermann C, Weiskopf D (2020) Verhaltens- und Verhältnisprävention Hautkrebs. Hautarzt 71(8):572–579

45. Matzarakis A (2013) Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. Gefahrst Reinhalt Luft 73:115–118

46. Holman DM, Kapelos GT, Shoemaker M et al. (2018) Shade as an environmental design tool for skin cancer prevention. Am J Public Health 108(12):1607–1612

47. Bundesamt für Strahlenschutz (2023) UV-Index. www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/uv-index/uv-index_node.html (Stand: 30.06.2023)

48. Deutscher Wetterdienst (2023) Vorhersagen des UV-Index und der UV-Dosis für wolkenlosen und für bewölkten Himmel. https://kunden.dwd.de/uvi_de (Stand: 30.06.2023)

49. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2023) Schutz vor UV-Strahlung der Sonne. www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physikalische-Faktoren-und-Arbeitsumgebung/Optische-Strahlung/Sonnenstrahlung.html (Stand: 30.06.2023)

50. Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) vom 18. Dezember 2008 (2008) (BGBl. I S. 2768), zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Juli 2019 (BGBl. I S. 1082) geändert (2019). www.gesetze-im-internet.de/arbmedvv/BJNR276810008.html (Stand: 04.07.2023)

51. Bundesamt für Strahlenschutz (2023). Schutz vor UV-Strahlung. www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/schutz/schutz_node.html (Stand: 30.06.2023)

52. Stiftung Deutsche Krebshilfe, Arbeitsgemeinschaft Dermatologische Prävention e.V., Uniklinik und Universität zu Köln, Universitäts KrebsCentrum Dresden (2023) Clever in Sonne und Schatten – Gelebter UV-Schutz in Kitas, Schulen und Vereinen. www.unserehaut.de/de/Lebenswelten/Clever-in-Sonne-und-Schatten-projekt.php (Stand: 30.06.2023)

53. European Skin Cancer Foundation (2023) SunPass – Gesunder Sonnenspaß für Kinder. www.escf-network.eu/de/willkommen/projekte/sunpass.html (Stand: 30.06.2023)

54. Bund/Länder Ad-hoc Arbeitsgruppe Gesundheitliche Anpassung an die Folgen des Klimawandels (2017) Handlungsempfehlungen fur die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bundesgesundheitsbl 60(6):662–672

55. Parisi AV, Turnbull DJ (2014) Shade provision for UV minimization: A review. Photochem Photobiol 90(3):479–490

56. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V. (2023) Straßenbaumliste. https://galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste (Stand: 30.06.2023)

57. Schmauck S (2019) Dach- und Fassadenbegrünung – Neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen. Bundesamt für Naturschutz, Bonn. www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript538.pdf (Stand: 03.07.2023)

58. Bundesrat (2014) Dritte Verordnung zur Änderung der Berufskrankheiten-Verordnung. www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2014/0501-0600/534-14.pdf (Stand: 03.07.2023)

59. Bauer A, Haufe E, Heinrich L et al. (2020) Basal cell carcinoma risk and solar UV exposure in occupationally relevant anatomic sites: Do histological subtype, tumor localization and Fitzpatrick phototype play a role? A population-based case-control study. J Occup Med Toxicol 15:28

60. Bauer S, Wojtysiak A, Romanus E et al. (2022) Arbeitsschutz im Klimawandel – Solare UV-Belastung bei Arbeit im Freien. Ergebnisse eines Fachgesprächs. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fokus/Arbeitsschutz-Klimawandel.html (Stand: 03.07.2023)

61. Diepgen TL (2013) Hautkrebs als Berufserkrankung. Forum 28(5):321–328

Impressum

Journal of Health Monitoring
www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber
Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur
Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen
Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter, Dr. Kirsten Kelleher,
Dr. Livia Ryl, Simone Stimm

Satz
WEBERSUPIRAN.berlin, Alexander Krönke

Bildnachweis
Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis
Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.

Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S4)
DOI 10.25646/11648
Robert Koch-Institut, Berlin

Karl-Christian Bergmann[1,2], Randolf Brehler[3], Christina Endler[4], Conny Höflich[5], Sabine Kespohl[6], Maria Plaza[7], Monika Raulf[6], Marie Standl[8], Roma Thamm[9], Claudia Traidl-Hoffmann[7], Barbora Werchan[10]

[1] Charité – Universitätsmedizin Berlin
Institut für Allergieforschung
[2] Fraunhofer-Institut für Translationale Medizin und Pharmakologie ITMP, Berlin
Immunologie und Allergologie
[3] Universitätsklinikum Münster
Klinik für Hautkrankheiten, Allergologie, Berufsdermatologie und Umweltmedizin
[4] Deutscher Wetterdienst, Freiburg
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung
[5] Umweltbundesamt, Berlin
Fachgebiet II 1.5 Umweltmedizin und gesundheitliche Bewertung
[6] Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)
Abteilung Kompetenz-Zentrum Allergologie/ Immunologie
[7] Universitätsklinikum Augsburg
Medizinische Fakultät, Umweltmedizin
[8] Helmholtz Zentrum München
Environmental Health Center, Institut für Epidemiologie
[9] Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
[10] Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst, Berlin

Eingereicht: 20.01.2023
Akzeptiert: 07.06.2023
Veröffentlicht: 06.09.2023

Auswirkungen des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Deutschland

Abstract

Hintergrund: Allergische Erkrankungen, vor allem Inhalationsallergien, haben ein epidemisches Ausmaß erreicht, und Umweltfaktoren spielen eine wichtige Rolle bei ihrer Entstehung. Der Klimawandel beeinflusst Auftreten, Häufigkeit und Schwere allergischer Erkrankungen.

Methode: Die Inhalte dieses Artikels wurden durch die Autorinnen und Autoren ausgewählt und entsprechend ihren Expertisen nach dem aktuellen Wissensstand kapitelweise erarbeitet. Die Kapitel wurden anschließend mit allen Autorinnen und Autoren diskutiert und abgestimmt.

Ergebnisse: Der Artikel beleuchtet direkte und indirekte Effekte des Klimawandels auf Allergien. Er geht näher auf Zusammenhänge zwischen Klimawandel und (neuen) Pollenallergenen sowie (neuen) beruflichen Inhalationsallergenen ein, erläutert Auswirkungen des Klimawandels auf das Krankheitsbild der Neurodermitis, geht auf Zusammenhänge zwischen Luftschadstoffen und Allergien ein und informiert über das Phänomen des Gewitterasthmas.

Schlussfolgerungen: Es besteht unter anderem Handlungsbedarf für die Bereiche Pollen- und Schimmelpilzsporenmonitoring, Allergie- und Sensibilisierungsmonitoring, Städteplanung unter allergologischen Gesichtspunkten und Veränderungen der Arbeitswelt.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

KLIMAWANDEL · ALLERGIE · POLLEN · BERUF · INHALATIONSALLERGENE · LUFTSCHADSTOFFE · MONITORING

1. Allergien in Zeiten des Klimawandels

Allergische Erkrankungen, vor allem Inhalationsallergien, haben ein epidemisches Ausmaß erreicht, und Umweltfaktoren spielen eine wichtige Rolle bei ihrer Entstehung. Der Klimawandel geht mit der Veränderung weiter Bereiche unserer Umwelt einher und beeinflusst damit Auftreten, Häufigkeit und Schwere allergischer Erkrankungen.

Der vorliegende Beitrag beleuchtet direkte und indirekte Effekte des Klimawandels auf Allergien. Die Inhalte der Arbeit wurden durch die Autorinnen und Autoren ausgewählt und entsprechend ihren Expertisen nach dem aktuellen Wissensstand kapitelweise erarbeitet. Die Kapitel wurden anschließend mit allen Autorinnen und Autoren diskutiert und abgestimmt.

Der Beitrag beginnt mit Begriffsdefinitionen und Häufigkeiten allergischer Erkrankungen und geht auf Pollen als Haupt-Trigger allergischer Atemwegserkrankungen näher ein. Anschließend werden Zusammenhänge zwischen Klimawandel und (neuen) Pollenallergenen sowie (neuen)

beruflichen Inhalationsallergenen näher beleuchtet und Auswirkungen des Klimawandels auf das Krankheitsbild der Neurodermitis dargelegt, Zusammenhänge zwischen Luftschadstoffen und Allergien werden erläutert, und es wird über das Phänomen des Gewitterasthmas informiert. Handlungsempfehlungen zu den Themen Pollen- und Schimmelpilzsporenmonitoring, Allergie- und Sensibilisierungsmonitoring, Städteplanung unter allergologischen Gesichtspunkten und Veränderungen der Arbeitswelt schließen den Beitrag ab.

1.1 Begriffsdefinitionen: Allergie, Sensibilisierung, Atopie

Eine Allergie bezeichnet eine übersteigerte Antwort des Immunsystems auf einen normalerweise harmlosen Stoff aus der Umwelt. Abhängig davon, auf welche Weise das Immunsystem auf diesen Stoff, das sogenannte Allergen, reagiert, werden vier Allergietypen unterschieden, von denen der Typ I, auch als Soforttyp bezeichnet, und der Typ IV am häufigsten vorkommen (Tabelle 1). Klassische Typ-I-Allergien sind die allergische Rhinitis/Rhinokonjunktivitis, auch bekannt als Heuschnupfen, und das allergische Asthma bronchiale. Der klassische Vertreter einer Typ-IV-Allergie ist das allergische Kontaktekzem. Warum das Immunsystem auf manche Stoffe aus der Umwelt allergisch, d. h. übersteigert reagiert, ist nicht abschließend geklärt.

Im Kontext von Allergien wird von Typ-I-Sensibilisierung gesprochen, wenn allergenspezifische Immunglobulin E (IgE)-Antikörper im Blut nachgewiesen werden können und/oder der Hauttest (Prick- oder Intrakutantest) positiv ist. Nach erfolgter Sensibilisierung führt die erneute Exposition mit dem Allergen bei allergischen Menschen zur Freisetzung von Botenstoffen, die für die allergischen Symptome verantwortlich sind.

Unter Atopie (atopía, griech. = Ortlosigkeit) wird eine familiär auftretende Neigung zur Entwicklung allergischer Erkrankungen (insbesondere vom Soforttyp/Typ I) auf der Grundlage einer immunologischen Überempfindlichkeit

Bezeichnung (Typ)	Art bzw. Ablauf der Reaktion	Dauer vom Kontakt zum Auftreten	Erscheinungsform (Beispiele)
Typ I Soforttyp, Frühtyp	Vermittlung durch IgE-Antikörper; Freisetzung von Botenstoffen (v. a. Histamin)	Wenige Sekunden bis Minuten (evtl. 2. Reaktion nach 4 – 6 Stunden)	Allergische Rhinitis/Konjunktivitis, allergisches Asthma, Nesselsucht (Urtikaria), Insektengiftallergie, anaphylaktischer Schock
Typ II zytotoxischer Typ	Bildung von Komplexen aus Antigenen und Antikörpern; Zerstörung körpereigener Zellen	6 – 12 Stunden	Transfusionsreaktionen, manche Arzneimittelreaktionen und Autoimmunerkrankungen
Typ III Immunkomplextyp	Bildung von Antigen-Antikörper-Komplexen; Freisetzung Gewebe schädigender Substanzen	6 – 12 Stunden	Allergische Gefäßentzündung (Vaskulitis), Serumkrankheit, exogen-allergische Alveolitis (z. B. Farmerlunge)
Typ IV Spättyp, verzögerter Typ	Vermittlung durch Zellen (T-Lymphozyten)	12 – 72 Stunden	Allergisches Kontaktekzem, Arzneimittelreaktionen, Abstoßungsreaktionen von Transplantaten

Tabelle 1
Übersicht allergischer Reaktionstypen
Quelle: Allergieinformationsdienst [1]

von Haut und Schleimhäuten gegen Allergene verstanden, die mit einer erhöhten Produktion von IgE-Antikörpern und der Bildung von allergenspezifischen IgE-Antikörpern einhergeht. Atopikerinnen und Atopiker sind also eine Teilgruppe von Menschen mit Allergien und zeigen häufig einige typische klinische Zeichen. Dazu zählen eine doppelte Lidfalte am Unterlid (Dennie-Morgan-Falte), dunkle Haut im Bereich der Augen, die Ausdünnung der seitlichen Augenbrauen (Hertoghe-Zeichen), eine überwiegend trockene und juckende Haut sowie eine trockene Kopfhaut.

1.2 Häufigkeiten allergischer Erkrankungen und Sensibilisierungen

Allergische Erkrankungen haben über die letzten Jahrzehnte weltweit stark zugenommen und stagnieren zurzeit auf einem hohen Niveau. Schätzungen zufolge sind insgesamt rund 20–30 Millionen Menschen in Deutschland von Allergien betroffen [2], wobei das Alter bei Erstmanifestation einer Allergie tendenziell abnimmt [3]. Die Zunahme allergischer Erkrankungen ging mit zeitgleich stattfindenden Veränderungen in Lebensstil und Umwelt einher. Viele damit verbundene Faktoren konnten mit dem vermehrten Auftreten von Allergien in Zusammenhang gebracht werden, wie sich das beispielsweise an Ostdeutschland-Westdeutschland-Vergleichen oder an Bauernhofstudien illustrieren ließ [4].

Bevölkerungsbezogene Querschnittsdaten

Bevölkerungsrepräsentative Aussagen zur Epidemiologie allergischer Erkrankungen in Deutschland liefert das kontinuierliche Gesundheitsmonitoring am Robert Koch-Institut [5]. Für Erwachsene stammen die aktuellsten Daten aus der bundesweiten Befragungsstudie Gesundheit in Deutschland aktuell (GEDA 2019/2020-EHIS), die zwischen April 2019 und September 2020 durchgeführt wurde und in die der Fragebogen des alle fünf Jahre stattfindenden europäischen Gesundheitssurveys (European Health Interview Survey, EHIS) integriert ist. Basierend auf der Selbsteinschätzung der Befragten besteht ein Asthma bronchiale (einschließlich eines allergischen Asthmas) aktuell, d. h. in den letzten zwölf Monaten vor der Erhebung, bei 8 % der Erwachsenen. Fast ein Drittel der Erwachsenen (31 %) bejahte die Frage, aktuell von einer Allergie betroffen zu sein. Als Allergien werden in GEDA 2019/2020-EHIS „Heuschnupfen, allergische Reaktionen der Augen oder der Haut, Lebensmittelallergien oder andere Allergien (außer allergischem Asthma)“ erfragt. Frauen berichteten insgesamt häufiger von allergischen Erkrankungen betroffen zu sein als Männer [6].

Eine differenzierte Erhebung der Häufigkeit ärztlich diagnostizierter allergischer Erkrankungen fand zuletzt im bundesweiten Befragungs- und Untersuchungssurvey Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS) von 2008 bis 2011 statt. Damals gaben rund 16 % der Erwachsenen an, jemals die ärztliche Diagnose Heuschnupfen (allergische Rhinitis) erhalten zu haben. Allergische Rhinitis ist damit die häufigste allergische Erkrankung. Die Lebenszeitprävalenz für Asthma bronchiale lag bei rund 9 % (allerdings haben nicht alle Asthma-Formen eine allergische Genese). Ähnlich häufig wie das Asthma bronchiale war das allergische Kontaktekzem, das auch bei etwa jedem elften Erwachsenen (9 %) schon einmal im Leben ärztlich diagnostiziert worden war. Weniger präva-

lent waren jemals gestellte Arztdiagnosen für Nahrungsmittelallergie (5 %), Neurodermitis (4 %) und Insektengiftallergie (3 %). Mit Ausnahme der Neurodermitis waren Frauen häufiger von allergischen Erkrankungen betroffen als Männer [7].

Höher noch als die Zahl der Erkrankten ist die Zahl der Sensibilisierten. Die DEGS-Studie ergab, dass bei 50 % der Erwachsenen in Deutschland im Serum allergenspezifische IgE-Antikörper gegen Umweltallergene nachweisbar waren. 34 % der Erwachsenen waren beispielsweise gegen eine Mischung aus Lieschgras-, Roggen-, Birken-, Beifußpollen, Katze, Hund, Hausstaubmilbe und *Cladosporium herbarum* (sx1-Allergenmischung) sensibilisiert, 26 % gegen Nahrungsmittelallergene (wobei lediglich 2 % ausschließlich gegen Nahrungsmittelallergene sensibilisiert waren) und jeweils 19 % gegen Gräser- bzw. Baumpollen. Gegen Kräuterpollen waren 11 % sensibilisiert [8].

Für Kinder und Jugendliche wurden zuletzt auf Basis der zweiten Folgeerhebung der Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland (KiGGS Welle 2; Datenerhebung 2014 bis 2017) bevölkerungsbezogene Prävalenzen allergischer Erkrankungen und Sensibilisierungen abgeleitet. Demnach erhielten 11 % aller Kinder und Jugendlichen im Alter von 0 bis 17 Jahren schon einmal im Leben die ärztliche Diagnose Heuschnupfen, bei Asthma bronchiale waren es 6 %. Jungen waren jeweils häufiger betroffen als Mädchen. Die Lebenszeitprävalenz für Neurodermitis betrug 13 %, wobei Mädchen häufiger betroffen waren als Jungen. Bei jeweils 3 % der Mädchen und der Jungen wurde schon einmal im Leben ein allergisches Kontaktekzem ärztlich diagnostiziert [9].

37 % der Kinder und Jugendlichen in Deutschland waren gegen die sx1-Allergenmischung bestehend aus den oben genannten acht Inhalationsallergenen sensibilisiert. Die Prävalenz von Sensibilisierungen gegen Lieschgras- und Roggenpollen, Birkenpollen bzw. Hausstaubmilben lag zwischen 14 und 23 %, die Prävalenz gegen die meisten der getesteten Tier- und Nahrungsmittelallergene zwischen 5 und 11 %. Jungen waren generell häufiger sensibilisiert als Mädchen.

Eine spezielle Faktoranalyse bezüglich der Sensibilisierungsmuster identifizierte für Mädchen und Jungen gleichermaßen sieben Sensibilisierungsgruppen, nämlich „Lieschgras-/Roggenpollen", „Birkenpollen/Apfel", „Lebensmittel/Beifußpollen", „Hausstaubmilben", „Tiere", „Kuhmilch/Eiklar" und „Schimmelpilze" [9, 10].

Bevölkerungsbezogene Längsschnittdaten

Untersuchungen zu Entwicklungen auf individueller Ebene (Längsschnitt) im Rahmen der KiGGS-Kohorte ergaben, dass jedes fünfte Mädchen (21 %) und jeder dritte Junge (29 %) im Verlauf von zehn Lebensjahren eine Sensibilisierung gegen zumindest eines der sx1-Allergene neu entwickelt hat (kumulative 10-Jahres-Inzidenz). Auf der anderen Seite zeigte sich, dass eine einmal nachgewiesene Sensibilisierung größtenteils persistierte. Nur bei 11 % der betroffenen Mädchen und 6 % der betroffenen Jungen war die sx1-Sensibilisierung gut zehn Jahre später nicht mehr nachweisbar (Remission) [11]. Längsschnittliche Ergebnisse bei Erwachsenen weisen darauf hin, dass es sich bei der beobachteten Zunahme der Prävalenz von sx1-Sensibilisierungen am ehesten um einen Kohorteneffekt handelt, bedingt durch höhere Prävalenzen in jüngeren Geburtskohorten [12].

Allergische Erkrankungen, vor allem Inhalationsallergien, haben ein epidemisches Ausmaß erreicht. Einer der häufigsten Auslöser von Inhalationsallergien sind die in Pollen enthaltenen Allergene.

1.3 Allergie-Trigger Pollen

Der häufigste Auslöser allergischer Atemwegserkrankungen sind Pollen bzw. die darin enthaltenen Allergene.

Pollen besteht aus Pollenkörnern, die einen Durchmesser von weniger als 10 µm (z. B. Pollen des Wald-Vergissmeinnicht) bis zu mehr als 100 µm (z. B. Pollen der Weißtanne) haben können [13].

Pollen dient der Fortpflanzung der Pflanzen. Die Übertragung der Pollenkörner von der männlichen Anthere auf die weibliche Narbe wird als Bestäubung bezeichnet. Dabei werden zwei grundlegende Arten der Bestäubung unterschieden: Bei Autogamie (Selbstbestäubung) wird der Pollen auf die Narbe derselben Blüte oder auf die Narbe einer anderen Blüte derselben Pflanze (Geitonogamie) übertragen. Bei Allogamie (Fremdbestäubung) erfolgt die Übertragung des Pollens einer Pflanze auf die Blüte einer anderen Pflanze. Für die Bestäubung werden Transportvektoren wie Wasser (Hydrogamie), Tiere (Zoogamie) oder Wind (Anemogamie) genutzt. Die häufigste Methode der Pollenübertragung ist die Zoogamie, in Deutschland speziell die Insektenbestäubung (Entomogamie), z. B. beim Löwenzahn oder dem Apfelbaum.

Aus allergologischer Sicht spielen anemophile Pflanzen, d. h. Pflanzen mit Eigenschaften, die die Übertragbarkeit von Pollen durch Wind begünstigen, hierzulande aber die größte Rolle: Die meisten Allergie-relevanten Pollentaxa gehören zu dieser Gruppe. Die im Allgemeinen große Menge an Pollen anemophiler Pflanzen in der Luft führt zu einer erhöhten Exposition des Menschen gegenüber diesen Pollen, womit sich auch die Möglichkeit erhöht, eine Sensibilisierung und allergische Symptome zu entwickeln. Typische Vertreter anemophiler Pflanzen mit Allergie-relevantem Pollen sind Hasel, Erle, Birke, Eiche, Gräser und Beifuß. Aber auch Pollen entomophiler Pflanzen kann hierzulande in Mengen in die Luft gelangen, die ausreichen, eine Sensibilisierung oder Allergie auszulösen, z. B. der Pollen des Götterbaums [14].

2. Klimawandel und Allergien: Direkte und indirekte Effekte

Wie bereits im einleitenden Artikel des Sachstandsberichts erwähnt [15], hat sich in Deutschland die mittlere Lufttemperatur seit Beginn der flächendeckenden Wetteraufzeichnungen 1881 um etwa 1,6 °C erhöht. Bis zum Ende des Jahrhunderts (2071 – 2100) wird in Deutschland je nach Emissionsszenario eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von mindestens 1 °C bis hin zu mehr als 4 °C erwartet, mit der stärksten Erwärmung in den Alpen und im Alpenvorland. Insgesamt wird erwartet, dass die Erwärmung in den verschiedenen Jahreszeiten ähnlich ausgeprägt sein wird mit Ausnahme des Frühjahrs, hier zeigen Modellrechnungen eine etwas geringere Erwärmung [16, 17]. Der Niederschlag in Deutschland hat seit 1881 in der Jahressumme um 8 % zugenommen. Während die größte Zunahme dabei im Winter zu verzeichnen ist, gefolgt von Frühling und Herbst, hat der sommerliche Niederschlag hingegen leicht abgenommen. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts ist im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 2000 eine Zunahme der jährlichen Niederschlagsmenge um weitere 8 % zu erwarten. Dabei finden sich die größten Zunahmen mit bis zu 17 % im Winter. Im Sommer hingegen ist tendenziell eine Abnahme des Niederschlags zu erwarten. Es sei anzumerken,

dass sich modellierte Änderungen unterhalb 10 % nicht von der natürlichen Klimavariabilität unterscheiden lassen [17].

Für die Pflanzenentwicklung spielen neben Temperatur und Niederschlag auch Verdunstung und Bodenfeuchte eine Rolle. Die Verdunstung nimmt in der Regel bei höheren Temperaturen zu. Wenn sich gleichzeitig die Niederschläge weniger stark verändern, führt das bei unveränderter Landnutzung zu einer schnelleren Austrocknung der Böden während der Vegetationsperiode. Die Zahl von Tagen mit niedriger Bodenfeuchte hat seit 1961 bereits deutlich zugenommen und wird weiter zunehmen [17, 18]. Folglich nimmt die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen innerhalb der Vegetationsperiode ab und es ist vermehrt mit Trockenheit und Dürre zu rechnen. Im Zeitraum 1971–2000 lag die durchschnittliche Anzahl der Dürremonate in Deutschland bei ungefähr zwei Monaten pro Jahr. Bei einer Erwärmung von 3 °C würde sich die Dürredauer verdoppeln [19]. Zugleich führt ein Temperaturanstieg zu einer Erhöhung des Potenzials für extreme Niederschlagsereignisse. In der Folge kann es verstärkt zu Überschwemmungen kommen [20]. Mit der Zunahme von Extremereignissen steigt auch das Potenzial für das sogenannte Gewitterasthma (Infobox).

Infobox
Extremwetter und Asthma

Im Zuge des Klimawandels und zunehmender Extremwetterereignisse könnte auch das Phänomen des Gewitterasthmas in Deutschland an Bedeutung gewinnen. So können vor allem bei Menschen mit Heuschnupfen und allergischem Asthma schwere Asthmaanfälle bei Gewittern auftreten. Auch bei Menschen, die nur an Heuschnupfen leiden, wurde bei Gewittern Asthma beobachtet. Das Phänomen des Gewitterasthmas trat bislang relativ selten auf: Weltweit wurden seit 1983 etwa 30 solcher Ereignisse registriert, vor allem in Australien und England. Die genauen Mechanismen des Gewitterasthmas sind noch nicht vollständig erforscht [21–23].

Wesentliche Merkmale von Gewitterasthma sind:

- Auftreten vorwiegend im späten Frühjahr und Sommer bei speziellen Wetterereignissen wie z. B. Gewitter oder Konvergenzlinien
- (Ungewöhnlich) hohe Konzentration von Aeroallergenen in der Luft, zum Teil auch schon Tage vor dem Wetterereignis (Aeroallergene in Verbindung mit Gewitterasthma sind vor allem Gräserpollen, ferner auch Baum- und Kräuterpollen sowie Pilzsporen; durch Wetteränderungen wie Niederschlag, Zunahme der Feuchtigkeit und Blitzaktivität können Pollen fragmentiert werden, wodurch kleinere, gut lungengängige Partikel entstehen, an die Allergene gebunden sind und die durch starke Fallwinde zum Boden transportiert werden)
- Auftreten der Symptome häufig während der ersten 20 bis 30 Minuten des Wetterereignisses (erhöhtes Risiko für schwere Symptome wie z. B. akute Asthmaanfälle, erhöhtes Risiko für Zunahme von Besuchen in der Notaufnahme)

2.1 Klimawandel und (neue) Pollenallergene

Veränderungen in der phänologischen Entwicklung Pollen-produzierender Pflanzen

Die Pflanzenentwicklung und damit auch die Pollensaison hängen maßgeblich vom Zusammenspiel von Temperatur und Niederschlag ab. Bereits in den letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts haben sich die phänologischen Jahreszeiten, d. h. die Eintrittsdaten unterschiedlicher Entwicklungsstadien von Pflanzen (von der Blüte bis zum Blattfall), teilweise deutlich verschoben [17], was auch eine Verschiebung der Pollensaison nach sich zog. So zeigt sich am Beispiel von Hasel, dass sich der Beginn der Blüte seit 1951 um etwa einen Monat verfrüht hat, während der Beginn

der Blattverfärbung der Stieleiche (Spätherbst), der hier als Indikator für das Ende der Vegetationsperiode herangezogen wird, nur geringfügig später eingetreten ist (Abbildung 1). Das Ende der Vegetationsperiode wird in aller Regel weniger durch die Temperatur als vielmehr durch die Tageslänge gesteuert. Dadurch bleiben der Eintritt des Spätherbstes und der Zeitpunkt des Winterbeginns relativ konstant, sodass sich durch den früheren Beginn des Frühlings die Vegetationsperiode verlängert [17]. Ein ähnlicher Trend wie bei der Hasel zeigt sich auch bei der Schwarzerle, einer in Deutschland weit verbreiteten Erlenart. Zudem lässt vor allem die nicht einheimische Purpurerle die Erlenpollensaison früher beginnen. In sehr milden Wintern und an begünstigten Standorten können Hasel und Purpurerle sogar schon im November zu blühen beginnen [24, 25]. In manchen Jahren fliegen die letzten Gräser- und Brennnesselpollen ebenfalls im November [25].

Phänologie und Pollensaison laufen nicht zwangsläufig synchron. So können beispielsweise Pollen aus klimatisch begünstigten Gebieten, in denen die Blüte bereits eingesetzt hat, über weite Distanzen in Gebiete transportiert werden (Ferntransport), in denen die Blüte noch nicht eingesetzt hat, und dadurch die Pollensaison auch dort früher beginnen lassen.

Es ist davon auszugehen, dass durch den fortschreitenden Klimawandel eine weitere Verfrühung der Pollensaison

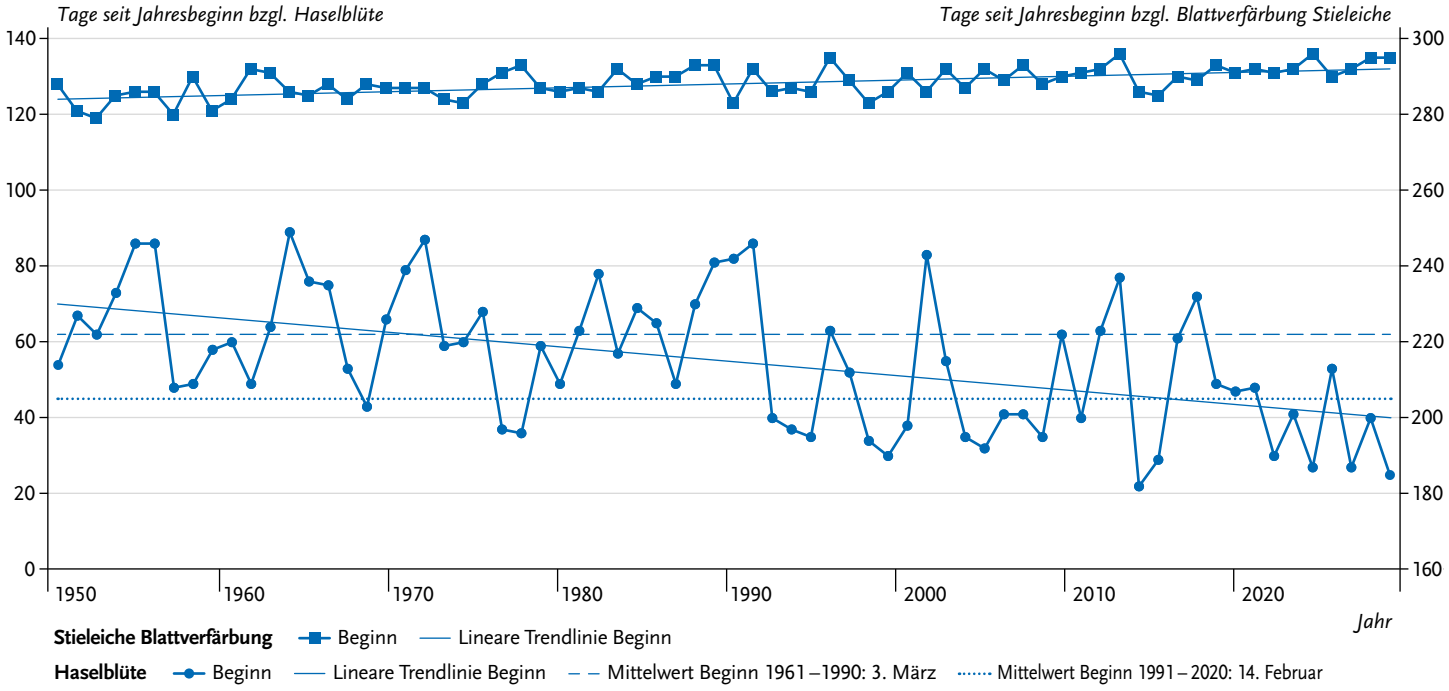


Abbildung 1
Blühbeginn Hasel und Blattverfärbung Stieleiche seit 1951 als Indikatoren für Start und Ende der Vegetationsperiode
Quelle: Deutscher Wetterdienst [26]

zu erwarten ist, auch wenn Pflanzen der gemäßigten Breiten für die Blühinduktion oft eine gewisse Kälteexposition während der kalten Jahreszeit benötigen und infolge steigender Temperaturen das Kältebedürfnis gegebenenfalls nicht mehr gewährleistet werden kann. Ettinger et al. [27] fanden z. B. heraus, dass es bei einer Erwärmung im Winter von über 4 °C (mittlere Temperatur) zu einer Verspätung in der Phänologie im Frühjahr infolge einer verringerten Kälteexposition kommen kann.

Die Blühzeiten und damit das zeitliche Auftreten von Pollen ändern sich. Auch Veränderungen der Pollenkonzentration und Veränderungen im Spektrum allergener Pollen sind zu erwarten.

Einfluss des Klimawandels auf die Pflanzenproduktivität

Infolge steigender CO_2-Konzentrationen ist eine Zunahme der Pollenmenge zu erwarten, was z. B. Experimente an Ambrosia [28, 29] und Wiesen-Lieschgras [30] belegen. Hohe Pollenkonzentrationen treten auch in sogenannten Mastjahren auf. Das sind Jahre, in denen es bei bestimmten Baumarten zu einer gesteigerten Samenproduktion kommt. Mastjahre unterliegen dabei einem spezifischen Zyklus; für Buche, zum Beispiel, beträgt dieser etwa drei bis sechs Jahre und für Eiche sechs bis zwölf Jahre [31]. Auch wenn der Pollen von Buche und Eiche (Familie Buchengewächse) ein geringeres Allergiepotenzial aufweist, kann die Allergenbelastung durch Kreuzreaktivitäten auf Pollen botanisch verwandter Arten – Birke, Erle, Hasel (Familie Birkengewächse) – erhöht sein. Darüber hinaus häuften sich in den letzten Jahren Mastjahre, was mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht wird [32, 33]. Nimmt die Frequenz von Mastjahren zu, könnten Bäume aufgrund des erhöhten Energiebedarfs wiederum anfälliger z. B. für Schädlinge und Trockenheit werden. Sind Bäume der gemäßigten Breiten einem andauernden Wassermangel ausgesetzt, wirkt sich dies negativ auf ihre Entwicklung aus, z. B. durch einen Rückgang der Pollenproduktion [34–36]. Trockenheit bzw. lang andauernde Dürreperioden werden zukünftig häufiger auftreten, was die letzten Jahre beispielhaft gezeigt haben [19]. Der Wechsel von Wetterextremen (Dürre und Überschwemmungen durch Starkregenereignisse) kann zu Trockenstress und Staunässe führen, womit nicht jeder Baum gut umgehen kann. So ist zum Beispiel eine schleichende Verschlechterung des allgemeinen Zustandes städtischer Birken zu beobachten [37].

Aufgrund des Einflusses des Klimawandels auf die Pflanzenentwicklung treten Veränderungen in der Exposition der Bevölkerung mit allergenen Pollen auf. Diese betreffen (a) den Zeitpunkt des Pollenflugs, (b) die Pollenkonzentrationen, (c) das Pollenspektrum und (d) die Allergenität der Pollen, u. a. in Verbindung mit Änderungen der Luftqualität, siehe Abschnitt 2.4 Luftschadstoffe.

Änderungen im zeitlichen Auftreten von Pollen

Benutzt man die symptomorientierte Definition einer Pollensaison der Europäischen Akademie für Allergologie und klinische Immunologie (European Academy of Allergy and Clinical Immunology [38]), so sind die stärksten Veränderungen in der Birkenpollengruppe zu beobachten (Hasel, Erle, Birke, Buche, Eiche, u. a.). Der Saisonbeginn dieser Gruppe trat in den letzten Jahrzehnten ca. zwei bis drei Wochen früher auf, endete allerdings auch früher [39–41]. Eine Dokumentation des früheren Beginns des Birkenpollenflugs ist auch anhand der seit Jahrzehnten veröffentlichten deutschlandweiten Pollenflugkalender der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) erkennbar [25]. Ähnliche Beobachtungen zeigen auch Daten zu Buchen-

pollen von zwei PID-Messstellen, die mehrere hundert Kilometer voneinander entfernt und in unterschiedlichen Höhen liegen [42].

Der Flug der Gräserpollen hat sich weniger stark verändert, mit einem tendenziell früheren Beginn. In einigen Ländern (Vereinigtes Königreich, Spanien, Portugal) wurde eine Verlängerung des Flugs von Gräserpollen beobachtet [43]. Infolge wärmerer Herbstmonate ist auch mit einem verlängerten Flug von Beifuß- und Ambrosiapollen zu rechnen; auf der Grundlage der Messungen zwischen 2011 und 2016 gibt der Pollenflugkalender 4.0 für Beifuß- und Ambrosiapollen ein mögliches Auftreten von Juni bis Ende Oktober/Anfang November an [25].

Insgesamt ergibt sich durch den früheren Beginn der Baumpollen- und die Verlängerung der Kräuterpollensaison in den Herbst hinein eine Spreizung der Pollensaison der allergenen Pflanzenarten – und damit eine Verlängerung der Beschwerdeperiode für diejenigen Menschen mit einer Pollenallergie, die sowohl auf Baum- als auch auf Gräser- und Kräuterpollen allergisch reagieren. Da Polysensibilisierungen grundsätzlich ein höheres Risiko zur Entwicklung stärkerer Symptome und Asthma bronchiale haben [44], stellt die verlängerte Expositionszeit für diese Personengruppe ein besonderes Risiko dar.

Veränderungen von Pollenkonzentrationen

Die Jahressummen der in Deutschland relevanten allergenen Pollen unterlagen in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten ständigen Veränderungen. So folgte z. B. bei der Birke einem Jahr mit hoher Pollenfreisetzung häufig ein Jahr mit

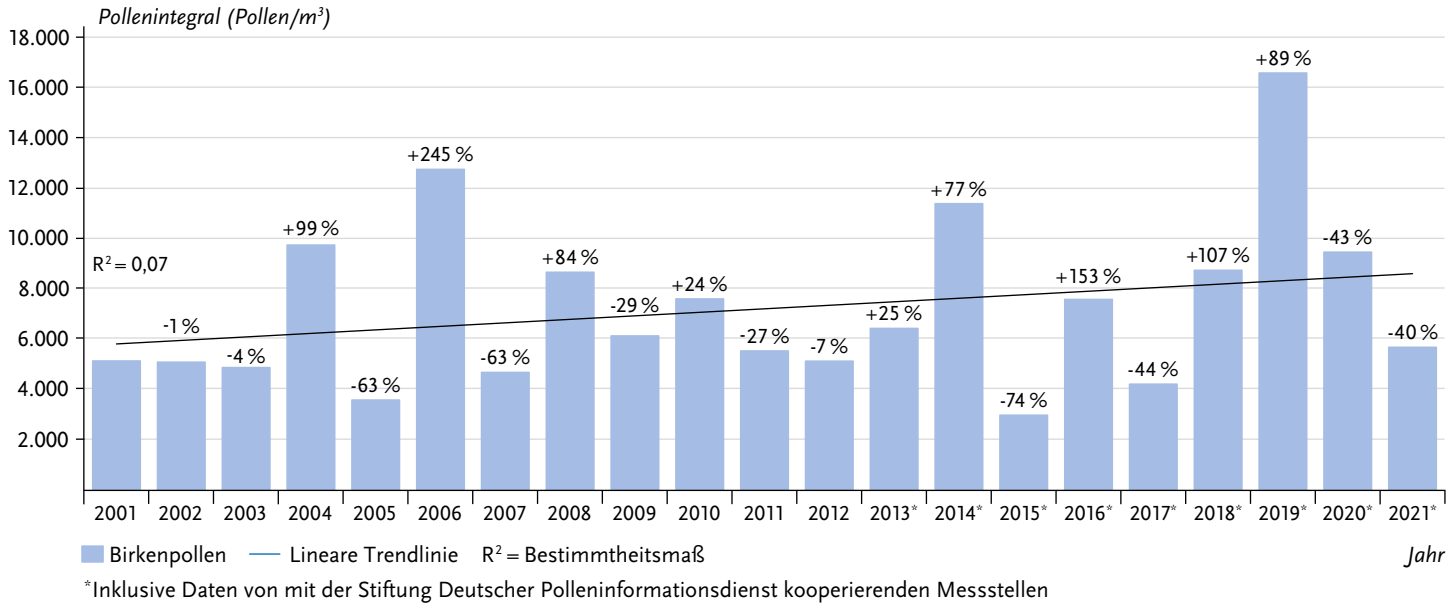


Abbildung 2
Übersicht über die mittlere in Deutschland an verschiedenen Messstationen pro Jahr gemessene Zahl an Birkenpollen mit Trendlinie. Prozentangaben zeigen die jeweilige Veränderung gegenüber dem Vorjahr an.
Quelle: Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst [46]

geringerer Freisetzung. In der Tendenz hat die mittlere Jahrespollensumme für Birke aber zugenommen (Abbildung 2). Für die PID-Messstelle in München hat auch die Zahl der Tage mit hohen Birkenpollenkonzentrationen (≥100 Pollen/m³) signifikant zugenommen [45].

Die einzige bisher publizierte Darstellung des Verlaufs der Jahrespollensummen von 23 Pollentypen aus 97 Messorten in Europa über die letzten Jahrzehnte ergab für zehn von ihnen signifikante Zunahmen, darunter Erle, Birke, Hasel, Esche, Platane, Eiche und Zypressengewächse. Dagegen zeigte die Jahrespollensumme von Beifuß eine signifikante Abnahme [47].

Die Ausprägung allergischer Symptome hängt aber nicht nur von der Pollenkonzentration ab. Maßgeblich ist auch der Allergengehalt der Pollen. Ein Gräserpollenkorn enthält < 1 bis 9 Pikogramm (pg) Phl p 5 (Majorallergen der Gräserpollen), der Mittelwert liegt bei 2,3 pg Phl p 5. Dabei setzen Gräserpollen Phl p 5 nicht kontinuierlich frei, sodass Patientinnen und Patienten trotz Pollenflug abhängig von klimatischen Bedingungen auch symptomfrei sein können. Die Konzentration freier Allergene steigt mit der Luftfeuchtigkeit [48]. Die Symptomatik von Menschen mit Allergien hängt damit nicht nur vom Ausmaß des Pollenflugs ab, sondern auch von klimatischen Bedingungen [49].

Veränderungen im Spektrum allergener Pollen

Im Zuge des Klimawandels wird sich das Spektrum allergener Pollen in Deutschland sehr wahrscheinlich weiter ändern:

(A) Die allergologische Bedeutung von Pollen einiger freiwachsender, aber nicht heimischer Pflanzenarten wird zunehmen.

(B) Neue Pollenallergene werden hinzukommen.

(C) Die allergologische Bedeutung von Pollen einiger heimischer Pflanzenarten kann sich im weiteren Verlauf ändern.

Auf Szenario A wird im Folgenden näher eingegangen. Für Szenario B stehen beispielhaft die Pollen des Olivenbaums [50, 51], für Szenario C beispielhaft die Pollen der Birke [52].

Szenario A, Beispiel 1: Pollen der Beifuß-Ambrosie

Die Beifuß-Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) ist in Nordamerika beheimatet und produziert in großen Mengen Pollen mit einem hohen Sensibilisierungs- und Allergiepotenzial [53, 54]. In den USA sind ebenso viele Menschen gegen die Beifuß-Ambrosie sensibilisiert wie gegen Gräser [55]. Nach Europa gelangte die Pflanze wahrscheinlich über Getreide oder Kleesaat und ist heute vor allem in der Ukraine, in Ungarn, Italien (Po-Ebene) und Frankreich (Rhonetal) verbreitet. In Deutschland wurde sie bereits 1860 wild wachsend gefunden und galt lange als unbeständig und selten, seit einigen Jahren breitet sie sich aber weiter aus [53, 54]. Neben dem Eintrag durch den Menschen scheinen die aktuellen Veränderungen des Klimas das Wachstum der Pflanze und deren Pollen- bzw. Allergenproduktion zu fördern [56].

In den Jahren 2006 und 2014 waren in Deutschland erhebliche Einträge von Ambrosiapollen über Ferntransport, wahrscheinlich aus Ungarn, nachweisbar (Abbildung 3). Aufgrund bestehender Kreuzreaktivitäten zum heimischen Beifuß hätten trotz des einmaligen Ereignisses klinische Beschwerden bei gegen Beifuß allergischen Patientinnen und Patienten auftreten können. Daten dazu existieren aber nicht.

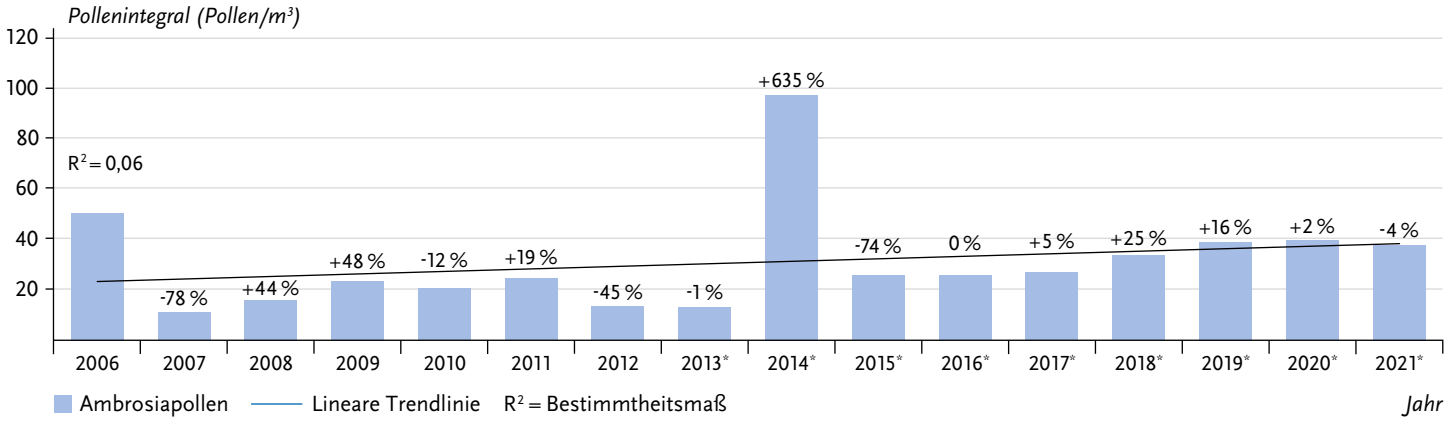


Abbildung 3
Übersicht über die mittlere in Deutschland an verschiedenen Messstationen pro Jahr gemessene Zahl an Ambrosiapollen mit Trendlinie. Prozentangaben zeigen die jeweilige Veränderung gegenüber dem Vorjahr an.
Quelle: Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst [46]

Verglichen mit den Ferntransportereignissen der Jahre 2006 und 2014 und mit dem deutschlandweiten Jahresdurchschnitt sind in der Region um Drebkau im südöstlichen Brandenburg seit etlichen Jahren deutlich höhere Pollenkonzentrationen nachweisbar, die aus der Etablierung der Pflanze in dieser Region resultieren (Tabelle 2).

Die klinische Relevanz dieser seit Jahren bestehenden Exposition ist bisher nicht umfassend untersucht. Daten aus Italien legen jedoch nahe, dass primäre Sensibilisierungen gegen Ambrosiapollen in der Region um Drebkau inzwischen deutlich höher sein dürften als im landesweiten Durchschnitt [58].

Für die Jahre 2041 bis 2060 gehen Lake et al. [59] auf der Grundlage unterschiedlicher Klimamodelle, verschiedener Pflanzenausbreitungsmodelle und zweier RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways, RCP4.5 und RCP8.5) für Gebiete im Süden Deutschlands davon aus, dass klinisch relevante Konzentrationen von Ambrosiapollen bereits im Juli/August auftreten werden. Darüber hinaus werden die Pollenkonzentrationen in der Hauptblütezeit über dem gesamten Bundesgebiet mindestens doppelt so hoch liegen wie im Vergleichszeitraum 1985–2005 und auch in der Nachsaison noch in klinisch relevanten Größenordnungen nachweisbar sein [59]. Bezüglich der bevölkerungsbezogenen Sensibilisierungen gegen Ambrosiapollen wird für Deutschland von einem Anstieg von 0 bis 10 % im Zeitraum 1985–2005 auf 15 bis 25 % im Zeitraum 2041–2060 ausgegangen [59].

Szenario A, Beispiel 2: Pollen des Glaskrauts

Das Aufrechte Glaskraut (*Parietaria officinalis*) ist in Mittel- und Südeuropa verbreitet und gilt in Deutschland als Archäophyt (d. h. vor 1492 dauerhaft eingetragene Pflanzenart). In südeuropäischen Ländern liegen patientenbezogene Sensibilisierungsraten gegen Glaskraut um die 20 %, in Deutschland liegt der Prozentsatz unter 10 % (Pricktest-Daten: [60], allergenspezifische IgE-Daten: [61]). Im Zuge des Klimawandels könnten sich Glaskrautpflanzen in

Tabelle 2
Jahressummen an Ambrosiapollen im Jahr 2010 an Messstellen in Nordrhein-Westfalen (NRW), Bayern und Brandenburg
Quelle: Höflich [56]

Standort der Messstelle	Jahrespollensumme (Pollen/m³)
Nordrhein-Westfalen (Mönchengladbach)	5
Bayern (München)	6
Brandenburg (Drebkau)	Knapp 2.500

Daten je einer Messstelle. Datenquellen NRW, Bayern: Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst, Details siehe Höflich et al. [50]. Datenquelle Brandenburg: Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg [57].

Deutschland ausbreiten und in der Folge zu einer Zunahme der Zahl von Patientinnen und Patienten mit einer Glaskrautallergie führen.

Szenario A, Beispiel 3: Pollen des Götterbaums
Der Götterbaum (*Ailanthus altissima*) ist mit Ausnahme der Antarktis auf allen Kontinenten vertreten, aber nur in Teilen von Asien heimisch. In Deutschland ist er derzeit vor allem innerhalb städtischer Wärmeinseln anzutreffen. Mit zunehmender Erwärmung ist mit seiner Ausbreitung über die Wärmeinseln hinaus zu rechnen [62]. Der Baum ist überwiegend insektenbestäubt, sein Pollen kann aber auch über den Wind verbreitet werden und könnte über mögliche Kreuzreaktivitäten hinaus auch hierzulande allergene Bedeutung erlangen [62–64].

2.2 Klimawandel und (neue) berufliche Inhalationsallergene tierischen, pflanzlichen und mikrobiellen Ursprungs

Infolge des Klimawandels werden sich in vielfältiger Weise die Bedingungen von Beschäftigten an verschiedenen Arbeitsplätzen verändern. Der Land- und Forstwirtschaftssektor mit mehr als 44 Millionen Arbeitsplätzen in der Europäischen Union (etwa 9,2 % der Gesamtbeschäftigten) und knapp einer Million Arbeitskräften in Deutschland [65] ist in hohem Maße klimaanfällig. Dabei weisen Studien auf starke regionale Unterschiede bei der räumlichen Verteilung der Klimaauswirkungen hin. Dies macht sich z. B. in den nördlichen Gebieten nicht nur in der Variabilität der Ernteerträge bemerkbar, sondern auch in einer Zunahme von Schädlingsbefall und Krankheiten, die wiederum zu gesundheitlichen Problemen bei den exponierten Beschäftigten führen können.

Eichenprozessionsspinner (EPS)

Eichenprozessionsspinner *(Thaumetopoea processionea)* gehören zu den Nachtfaltern (Familie: Zahnspinner). Die Brennhaare der Raupe können bei Menschen sowohl dermale (sogenannte Raupendermatitis) als auch respiratorische Beschwerden verursachen. Aus der gleichen Unterfamilie stammen der Pinienprozessionsspinner (*Thaumetopoea pityocampa*) und der Kiefernprozessionsspinner (*Thaumetopoea pinivora*), deren Verbreitung bisher überwiegend in Südeuropa beschrieben wurde, aber durch den fortschreitenden Klimawandel auch in Deutschland zu erwarten ist.

Prozessionsspinner, in Deutschland bisher überwiegend EPS, sind Profiteure des Klimawandels und führen nicht nur zu forstwirtschaftlichen Schäden in den befallenen Gebieten, sondern stellen auch eine gesundheitliche Gefährdung für den Menschen, u. a. für Landschafts- und Baumpfleger, dar. Die schwankenden Wetterbedingungen können einen großen Einfluss auf die Entwicklung dieses Nachtfalters haben [66]. Sehr starke Populationen wurden in den Frühjahrsmonaten bei milder Witterung beobachtet, wenn

Insbesondere Beschäftigte im Außenbereich sind durch Expositionen gegenüber pflanzlichen und tierischen Profiteuren des Klimawandels betroffen.

die Bedingungen besonders während des Falterfluges und der Eiablage im vorausgegangenen Spätsommer gut waren (wenig Wind und Niederschlag, viel Sonne).

Die gesundheitliche Gefährdung geht insbesondere vom dritten Larvenstadium aus, in dem die Raupen Brennhaare bilden, die das Protein Thaumetopoein (Nesselgift) enthalten. Die feinen Haare brechen leicht, können mit dem Wind hunderte Meter weit fliegen und sich über Widerhaken auf der Haut von Menschen und Tieren festsetzen. Bei direktem Kontakt mit den Brennhaaren der EPS kann es zu mechanisch-irritativen, toxischen und auch allergischen Reaktionen kommen, die zu Hautirritationen, Augenreizungen, Fieber, Schwindel und in Einzelfällen sogar zum allergischen Schock führen können. Beim Einatmen der feinen Härchen können zudem Atembeschwerden wie Bronchitis und Asthma auftreten.

Zecken

Zu den weiteren Profiteuren des Klimawandels gehören die Zecken, die wärmere Lufttemperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit bevorzugen. Vorausgegangene warme Sommer und milde Winter führen schon im Frühjahr zur Zeckenvermehrung. Die Zeckenart, die überall in Europa verbreitet ist, ist der Gemeine Holzbock (*Ixodes ricinus*). Eine ausführlichere Übersicht zum Einfluss des Klimawandels auf Zecken und andere Vektoren findet sich als Teil dieses Sachstandsberichts in Beermann et al. [67].

Der Gemeine Holzbock breitet sich durch mildere Winter in immer nördlichere und höher gelegene Gebiete aus und ist nicht nur bedeutsam als Überträger von Borreliose und Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME), sondern kann auch Sensibilisierungen induzieren. So zeigte sich in einer Studie in Südwestdeutschland, dass Forstangestellte sowie Jägerinnen und Jäger eine hohe Prävalenz an durch Zeckenstiche verursachtem Alpha-Gal-Syndrom haben. Dabei kann es zu einer (verzögerten) allergischen Reaktion durch rotes Fleisch (z. B. Rindfleisch, Wildfleisch) kommen [68].

Cryptostroma corticale

Ein weiteres gesundheitliches Problem, das durch den Klimawandel verstärkt werden könnte und insbesondere Beschäftigte während der Holzfällung einschließlich Holzbe- und -verarbeitung betrifft, stellt der Pilz *Cryptostroma corticale* dar. Seit Anfang der 2000er-Jahre tritt der Pilz aufgrund der Trockenheit und der wärmeren Sommer auch in unseren Breiten auf. Trockenheit und Hitzeperioden haben in den letzten Jahren zu einem verstärkten Ausbruch der Rußrindenkrankheit bei Ahornbäumen durch *Cryptostroma corticale* geführt. Der Befall mit *Cryptostroma corticale* verfärbt das Holz und macht es für die weitere Verarbeitung unbrauchbar. Das führt einerseits zu erheblichen forstwirtschaftlichen Schäden in der Holzindustrie, andererseits kann das Einatmen der Konidiosporen bei exponierten Personen zu gesundheitlichen Problemen führen und die Ursache für eine exogen allergische Alveolitis (Typ III-Allergie, siehe Tabelle 1) sein. Auch dieses ist ein berufliches Risiko (mit-)verursacht durch den Klimawandel [69].

Schimmelpilze

Erhöhte Feuchtigkeit kombiniert mit höheren Temperaturen und CO_2-Werten fördert das Pilzwachstum. Beschäftigte, die unmittelbar nach Hochwasserereignissen Renovierungsarbeiten durchführten, waren einer erhöhten Belastung mit Schimmelpilzen ausgesetzt [70]. Neben Sporen

sind auch Fragmente von Myzelfäden (0,2 bis 10 mm Länge) luftgetragene Allergenträger, die in noch größeren Mengen als Sporen auftreten können. Eine Schimmelpilzallergenexposition besteht also sowohl gegenüber Sporen als auch gegenüber Myzelfragmenten. Schimmelpilzexpositionen können verschiedene Erkrankungen der oberen und unteren Atemwege und der Haut verursachen, beispielsweise allergischen Schnupfen oder Asthma.

Hanfgewächse

Hanfgewächse gehören ebenfalls zu den Profiteuren des Klimawandels, da die Pflanze unter einer erhöhten UV-Strahlenbelastung, wie sie durch den Klimawandel entstehen kann, besser gedeiht. Darüber hinaus gewinnen Cannabis und Hanfgewächse als Rohstoffe mit anwachsender Produktpalette für Faserprodukte, Nahrungs- und Arzneimittel zunehmend an Bedeutung. Die steigende Produktpalette auf Hanfbasis führt dazu, dass immer mehr Beschäftigte in diesem wachsenden Industriezweig arbeiten. Durch eine Exposition gegenüber Bestandteilen der Cannabispflanze an diesen Arbeitsplätzen treten zunehmend mehr gesundheitliche Probleme auf, insbesondere auch allergische Beschwerden [71]. Sussman et al. [72] weisen darauf hin, dass durch die Zunahme der Cannabisverwendung hier ein Szenario vergleichbar mit dem durch Naturlatex-Exposition im Gesundheitswesen in den 1980er- und 1990er-Jahren auftreten könnte.

Neue Allergene im Zusammenhang mit der Nahrungs- und Futtermittelherstellung

Neben den direkten Einflüssen des Klimawandels auf die Allergenexposition an Arbeitsplätzen und damit häufig auch auf die Gesundheit der Beschäftigten finden durch den Klimawandel auch Lebensstiländerungen statt (z. B. vegane Ernährung, Insekten als Nahrungsquelle, fermentierte Pflanzenprodukte als Fleischersatz). Eine Folge dieser Lebensstiländerungen ist u. a. auch bei der Nahrungsmittelherstellung der verstärkte Einsatz von Enzymen, die wiederum zu Sensibilisierungen und allergischen Beschwerden führen können [73].

Auch Entwicklungen und Prozesse, die dem Klimawandel entgegenwirken und den Gedanken der Nachhaltigkeit verfolgen, können zu neuen oder veränderten Produkten und damit anderen Herstellungsprozessen und Expositionen an Arbeitsplätzen führen, sodass sich dieses auch als indirekte Beeinflussung des Klimawandels auf die Gesundheit der Berufstätigen auswirken kann. Als Beispiel sei hier die Exposition und das Sensibilisierungsrisiko bei der Herstellung von Phytase als Futterbestandteil von Nicht-Wiederkäuern (Geflügel, Schweine) genannt [74]. Durch Phytase lässt sich die Zugabe von anorganischem Phosphat vermindern und dadurch die Abwasserbelastung mit ausgeschiedenem Phosphat reduzieren.

2.3 Neurodermitis und Klimawandel

Neurodermitis (atopisches Ekzem, atopische Dermatitis) ist eine chronische, juckende, entzündliche Hauterkrankung, die für Patientinnen und Patienten eine erhebliche Belastung darstellt [75].

Sie wird durch Umweltveränderungen, wie sie bereits heute durch den Klimawandel in Deutschland und Europa auftreten, wie längere Hitzeperioden, Häufung von Tropennächten und höhere Durchschnittstemperaturen, ausge-

löst und verschlimmert. Menschen, die an Neurodermitis leiden, sollten Schutzmaßnahmen ergreifen, um sich vor UV-Strahlung und Hitze zu schützen. Frühwarnsysteme können Patientinnen und Patienten ermöglichen, ihren Alltag besser zu planen und ggf. bei extremer Hitze auf Aktivitäten im Freien zu verzichten oder sie auf die frühen Morgenstunden zu verlegen.

Einige Menschen mit Neurodermitis leiden zusätzlich unter einer Pollenallergie, wodurch die Symptomatik bei Hitze, Sonnen- und Pollenexposition weiter verschlimmert wird [76]. Der durch den Klimawandel veränderte Pollenflug kann somit genau für diese Gruppe zu einer erhöhten Symptomstärke führen [77].

Bestimmte Krankheiten können möglicherweise als Folge einer Exposition gegenüber schädlichen Umweltfaktoren oder fehlenden schützenden Faktoren gemeinsam mit der Neurodermitis auftreten. Hierzu gehören vor allem Allergien, allergisches Asthma, die eosinophile Ösophagitis (allergieähnliche Entzündung der Speiseröhre) und die Urtikaria (Nesselsucht). Die Neurodermitis ist ein Hauptrisikofaktor für die Entwicklung von Allergien [78]. Es wird vermutet, dass diese Erkrankungen durch komplexe genetische, epigenetische und immunologische Mechanismen in Verbindung stehen.

Aus dem demografischen Wandel und dem zunehmenden Auftreten von atopischen Erkrankungen im mittleren und fortgeschrittenen Lebensalter folgt, dass multimorbide und ältere Menschen auch immer mehr zu vulnerablen Gruppen für Folgen des Klimawandels werden.

2.4 Luftschadstoffe: Einfluss der Luftverschmutzung auf Pollenkörner, Aeroallergene und allergische Reaktionen

Experimentelle Studien zeigen, dass die kombinierte Wirkung von Pollen und Luftschadstoffen für Menschen mit Allergien besonders ungünstig ist. Die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die Gesundheit, wie von Breitner-Busch et al. [79] in diesem Sachstandsbericht beschrieben, und insbesondere auf Allergien der Atemwege hängen von einer Kombination von Faktoren ab, zu denen die Konzentrationen von Umweltschadstoffen (z. B. Stickstoffdioxid (NO_2), Kohlenmonoxid (CO), Ozon (O_3)), die Dauer der Exposition, die Belüftung, die klimatischen Bedingungen und die Wechselwirkung zwischen Schadstoffen und Pollen gehören. Was den letzten Punkt betrifft, so scheint die Luftverschmutzung mehrere Auswirkungen auf Pollenkörner zu haben: Veränderungen der biologischen und reproduktiven Funktionen, Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Pollenoberfläche, Veränderungen des allergenen Potenzials sowie eine adjuvante Wirkung, die potenzielle Gesundheitsrisiken erhöht [80].

Pollenwandschäden, Allergenfreisetzung und Verteilung in der Umwelt

Die Blüte- und Pollensaison reagiert empfindlich auf Umweltvariabilität in Bezug auf meteorologische Parameter, aber auch in Bezug auf Schadstoffe. In jüngster Zeit wurde eine frühere Blütezeit nachgewiesen, die auf die Kombination von höheren Temperaturen und Verstädterungsgrad zurückzuführen und an Standorten mit höheren NO_2-Konzentrationen am stärksten zu beobachten ist [40]. Anderer-

seits wurde bei mehreren Arten eine Abnahme der Lebensfähigkeit und/oder der Keimung von Pollen beobachtet, die in vitro sehr niedrigen O_3- bzw. NO_2-Konzentrationen ausgesetzt waren [81, 82]. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass Pollen in der Natur beiden Schadstoffen gleichzeitig ausgesetzt und damit synergistische Effekte zu erwarten sind, da das Vorhandensein von O_3 die NO_2-Aufnahme erhöht. Das begünstigt die Nitrierung von Proteinen und beeinträchtigt somit die Protein-/Enzymfunktionen [83].

Verschiedenen Studien zufolge sind Pollenkörner in Gebieten mit hoher Luftverschmutzung kleiner und brüchiger als in Gebieten mit geringerer Luftverschmutzung. Die Wechselwirkung zwischen Luftschadstoffen und Pollenkörnern könnte die Pollenwand schädigen und die Menge der in die Umwelt freigesetzten Allergene erhöhen [84], die schließlich bis in die unteren Atemwege eindringen und asthmabedingte Symptome hervorrufen können.

Es gibt Hinweise darauf, dass der Klimawandel und Luftschadstoffe als Pflanzenstressoren die Morphologie der Antigene und damit das allergene Potenzial der Pollenpartikel verändern. Pollen aus städtischen Gebieten und aus stärker luftverschmutzten Regionen hat einen höheren Allergengehalt pro Pollenkorn [85]. Ein höherer Allergengehalt wurde in Extrakten von Birkenpollen nachgewiesen, der hohen O_3-Konzentrationen ausgesetzt war [86].

Darüber hinaus zeigen einige Studien, dass Allergenität und Lebensfähigkeit einiger Pollenarten zunehmen, wenn die Vegetation vermehrt mit bestimmten Schadstoffen belastet ist. Es wurde festgestellt, dass NO_2, ein wichtiger verkehrsbedingter Luftschadstoff, die Allergenität des Birkenpollenallergens Bet v 1 erhöht [87].

Schließlich wirken mehrere Luftschadstoffe als Adjuvantien (verstärkende Hilfsmittel), indem sie sich an Allergene binden und die IgE-Synthese stimulieren, was zu einer Verschlimmerung der Asthmasymptome führt. Mehrere in-vitro-Studien haben gezeigt, dass verkehrsbedingte Luftschadstoffe Pollen verändern können, was die Häufigkeit und Intensität der Symptome bei Menschen mit Allergien erhöht [80, 88]. Bei prädisponierten Personen kann die Sensibilisierung der Atemwege auf Aeroallergene gefördert werden [89]. Indem sie eine Entzündung der Atemwege auslösen, können Schadstoffe die Schleimhautbarriere schädigen und damit eine allergene Reaktion auslösen [90]. Eine Schädigung der Atemwegsschleimhaut kann den Zugang der eingeatmeten Allergene zu den Zellen des Immunsystems erleichtern.

Pollenmonitoring ist ein wichtiges Instrument zur Aufdeckung der Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Gesundheit und sollte in die öffentliche Daseinsvorsorge aufgenommen werden.

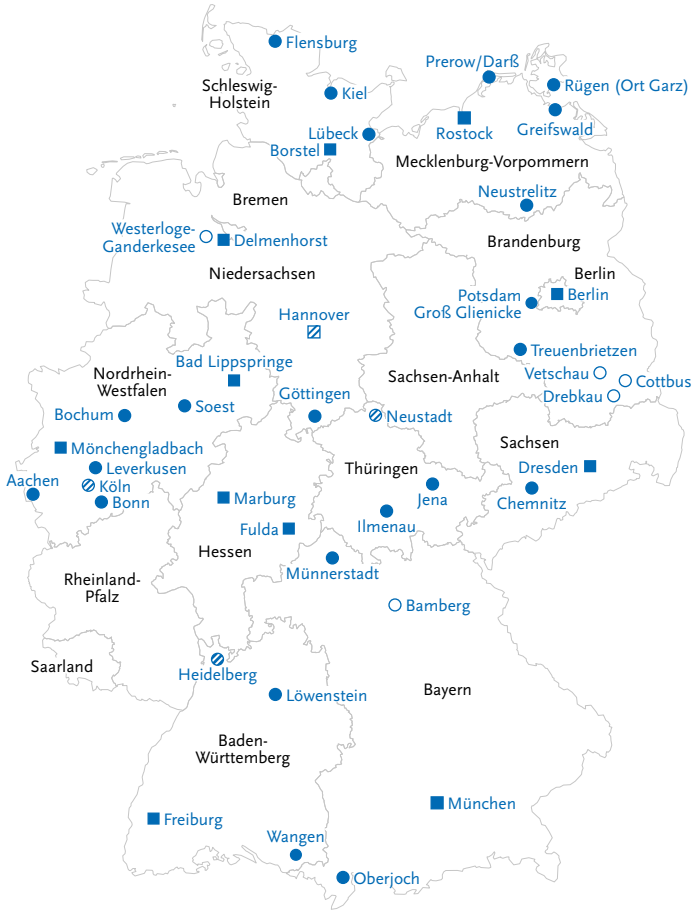
3. Handlungsempfehlungen

3.1 Pollen- und Schimmelpilzsporenmonitoring

Klinische und gesellschaftliche Bedeutung des Pollen- und Schimmelpilzsporenmonitorings

Für die Vorbeugung und Behandlung von pollen- oder pilzsporenassoziierten allergischen Erkrankungen der Atemwege gibt es verschiedene, sowohl medikamentöse als auch nicht-medikamentöse Ansätze [91]. Einer der primär nicht-medikamentösen Ansätze besteht darin, sich – als Betroffene oder Betroffener, als behandelnde Ärztin oder behandelnder Arzt – darüber informieren zu können, wann, wo und in welcher Menge allergieauslösende Pollen oder Pilzsporen in der Luft vorhanden sind, um (a) diese Orte, wenn möglich zu meiden und (b) ggf. bereits vor dem Auf-

Abbildung 4
Pollen- und Sporenmessstationen im PID-Messnetz, Stand Januar 2023
Quelle: Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst [97]



treten von Beschwerden antisymptomatisch wirkende Medikamente einnehmen zu können.

Die kontinuierliche Überwachung des Pollenflugs ermöglicht es darüber hinaus, lokale, regionale oder länderübergreifende Veränderungen des Pollenspektrums und des Pollenflugs zu beobachten. Für solche Beobachtungen, die als eines der Instrumente bei der Aufdeckung der Zusammenhänge zwischen Klimawandel, Natur und Gesundheit eingesetzt werden können, ist es notwendig, qualitativ hochwertige und langjährige Messreihen eines breiten Spektrums von Pollen- und Pilzsporenarten an denselben Standorten zu gewährleisten, wie von der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst seit 1983 realisiert.

Beprobung der Luft und Analyse von Pollen und Schimmelpilzsporen

Die Beprobung der Luft kann entweder passiv durch Sedimentation oder Filterung der Luft oder aktiv durch das Ansaugen eines definierten Luftvolumens mittels einer volumetrischen Pollen- und Sporenfalle erfolgen. Die anschließende Pollen- und Schimmelpilzsporenanalyse der Luftstaubproben erfolgt überwiegend lichtmikroskopisch, seltener durch DNA-Analyse oder durch neu entwickelte automatisierte Pollenbestimmung mittels verschiedener Verfahren (z. B. digitale Mikroskopie, Fluoreszenz) [92–96].

Status quo des Pollen- und Schimmelpilzsporenmonitorings in Deutschland

Wie in den meisten europäischen Ländern gibt es auch in Deutschland ein bundesweites Pollenmessnetz, welches hierzulande seit 1983 durch den PID betrieben wird. Eine Übersicht der aktuellen Messstandorte findet sich in Abbildung 4.

Das PID-Messnetz arbeitet derzeit auf der Grundlage der volumetrischen Sporenfalle vom Hirst-Typ [93] und lichtmikroskopischer Pollenanalyse [95]. Ein Teil der gemessenen Pollendaten bildet eine der Grundlagen für die

Ein Allergie- und Sensibilisierungsmonitoring sollte sowohl auf Bevölkerungs- als auch auf Patientenebene dauerhaft etabliert werden.

vom DWD erstellten Pollenbelastungsvorhersagen (Pollenflug-Gefahrenindex) für acht allergologisch bedeutsame Pollentypen [98]. Es ist bekannt, dass auch Pollen anderer Pflanzen und Schimmelpilzsporen Sensibilisierungen und Allergien auslösen. Das Monitoring des PID umfasst daher ein deutlich breiteres Spektrum von Pollentypen sowie einige allergologisch bedeutsame Pilzsporen, konkret *Alternaria*, *Cladosporium*, *Epicoccum* und *Pleospora* an einer begrenzten Anzahl von Messstationen. Auf der Grundlage dieser Daten gibt der PID detaillierte wöchentliche Pollen- und Sporenflugvorhersagen für Deutschland heraus [99]. Das bundesweite Pollenmonitoring bildet zudem die Grundlage für gesamtdeutsche und regionale Pollenflugkalender, die in mehrjährigen Abständen neu herausgegeben werden [25].

Weiterentwicklung des Pollenmonitorings

Die langfristige Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung des deutschlandweiten Pollenmonitorings sowie die Weiterentwicklung und Ausdehnung des Pilzsporenmonitorings können nur bei einer gesicherten Finanzierung gewährleistet werden.

Vor diesem Hintergrund formierte sich 2017 der fachübergreifende Arbeitskreis Bundesweites Pollenmonitoring und erarbeitete ein Positionspapier zu Perspektiven für ein bundesweites Pollenmonitoring in Deutschland [100]. In dem Papier wird eingegangen auf (a) die gesundheitliche und ökonomische Bedeutung von Pollen und Pollendaten, (b) Methoden zur Messung von Pollendaten, (c) den Status quo des bundesweiten Pollenmessnetzes in Deutschland, (d) Pollenmessnetze anderer europäischer Staaten, (e) gesetzliche Rahmenbedingungen in Deutschland und (f) Möglichkeiten für ein verlässliches bundesweites Pollenmessnetz. In seinem Fazit kommt der Arbeitskreis zu folgender Empfehlung: „Aufgrund der Bedeutung allergener Pollen für die menschliche Gesundheit und allergischer Erkrankungen für das Gesundheitssystem spricht sich der Arbeitskreis dafür aus, das bundesweite Pollenmonitoring in den Katalog staatlicher Aufgaben aufzunehmen, die der grundlegenden Versorgung der Bevölkerung mit wesentlichen Gütern und Dienstleistungen dienen (öffentliche Daseinsvorsorge)." Weiter heißt es: „Hinsichtlich möglicher Zuständigkeiten im Rahmen der öffentlichen Daseinsvorsorge wurden im Arbeitskreis mehrere Lösungsansätze diskutiert. Dazu gehörte die Möglichkeit, eine Bundeseinrichtung, wie z. B. den DWD, mit der Fortführung und Weiterentwicklung des bundesweiten Pollenmessnetzes zu beauftragen. Eine andere Möglichkeit wäre, die Aufgabe an die Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst oder andere Einrichtungen zu übertragen. Unabhängig von der zukünftigen Zuständigkeit kommt der Kooperation von messtechnischen, klinischen und wissenschaftlichen Einrichtungen eine grundsätzliche Bedeutung für die adäquate gesundheitliche Vorsorge zu." [100, S. 659].

3.2 Allergie- und Sensibilisierungsmonitoring

Monitoring auf Bevölkerungsebene

Allergien haben aufgrund der Anzahl Betroffener in Deutschland eine hohe Public-Health-Relevanz. Um Allergien im Kontext klimawandelbedingter Veränderungen mit geeigneten Maßnahmen der Primär-, Sekundär- und Tertiärprävention zu begegnen, sind die Beschreibung des Ist-

Bei der Planung von Stadtgrün muss das allergene Potenzial von Pflanzen berücksichtigt werden.

Zustands sowie die Beobachtung von Entwicklungen über die Zeit (Trends) im Sinne einer indikatorengestützten Surveillance kontinuierlich erforderlich. Surveillance ist durch die Weltgesundheitsorganisation definiert als „systematische, fortlaufende Erhebung, Zusammenführung und Analyse von Daten [...] und die zeitnahe Bereitstellung von Public-Health-Informationen zur Bewertung und Reaktion im Bereich der öffentlichen Gesundheit" [eigene Übersetzung nach [101, S. 14]).

Geeignete Allergieindikatoren betreffen einerseits Häufigkeit und Therapie manifester Erkrankungen mit klinischen Symptomen. Andererseits ist die Sensibilisierung als krankheitsnaher Risikofaktor relevant, da das Immunsystem einen zunächst harmlosen Umweltstoff (Allergen) als schädlich einstuft und mit einer allergenspezifischen Immunantwort reagiert. Nach erfolgter Sensibilisierung kann jeder weitere Kontakt mit dem Allergen zu Symptomen führen. In Deutschland besteht durch das bisherige Gesundheitsmonitoring am Robert Koch-Institut mit den bevölkerungsrepräsentativen Befragungs- inklusive Untersuchungssurveys bei Erwachsenen (DEGS) und Kindern/Jugendlichen (KiGGS) eine tragfähige Grundlage für die Etablierung einer Public-Health-Surveillance, die Allergien als nicht übertragbare Erkrankungen einschließt [102]. Informationsgrundlage sollten dabei sowohl Befragungs- und Untersuchungsdaten als auch Daten der amtlichen Statistik sowie Abrechnungs- und Versorgungsdaten sein. Darüber hinaus sollten Verläufe der häufigsten allergischen Erkrankungen (dazu zählen u. a. die Typ I-Erkrankungen allergische Rhinitis und allergisches Asthma bronchiale und die Typ IV-Erkrankung allergisches Kontaktekzem) über mehrere Altersgruppen hinweg gemeinsam untersucht werden.

Monitoring auf Ebene der Patientinnen und Patienten

Neben einem kontinuierlichen Monitoring auf Bevölkerungsebene dienen patientenbezogene Monitoring-Systeme dazu, Diagnostik, Schwere und Verlauf allergischer Erkrankungen im Rahmen des Versorgungssystems effizient zu erfassen. Informationsgrundlage sind hierbei in der Regel Daten, die zeitlich sehr engmaschig zentrums- bzw. studienspezifisch erhoben werden [60, 61].

Für die adäquate Versorgung von Patientinnen und Patienten vor allem mit Inhalationsallergien erscheint ergänzend zum Sensibilisierungsmonitoring auf Bevölkerungsebene ein solches System auf Patientenebene sinnvoll. In Ergänzung zu einem Register könnte ein Sensibilisierungsmonitoring auf Patientenebene gezielt Allergene in das Monitoring einbeziehen, die klinisch relevant werden könnten, im klinischen Alltag aber derzeit keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen, wie beispielsweise Amb a 1, das Hauptallergen von *Ambrosia*. Dies setzt voraus, dass für seltene und neue Allergene geeignete diagnostische Tools zur Verfügung stehen [61].

Die konkrete Ausgestaltung solch eines Monitorings könnte in Analogie zu den vom Arbeitskreis Bundesweites Pollenmonitoring erarbeiteten Perspektiven für ein bundesweites Pollenmonitoring fachübergreifend erarbeitet werden [100].

3.3 Städteplanung unter allergologischen Gesichtspunkten

Städtisches Grün kann einen Teil der negativen Auswirkungen des Klimawandels reduzieren. Parks, Straßenbäume, begrünte Fassaden und Dächer bilden Erholungsräume,

Kälteinseln, Gebäudekühlung, spenden Schatten, verbessern die Luftqualität und wirken sich positiv auf das Gesamtbefinden von Menschen aus [15].

Aber welches städtische Grün sollte angepflanzt werden? Diese Frage kann unter verschiedenen Gesichtspunkten angegangen werden. So hat die Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) aus ihrer seit den 1970er-Jahren geführten und regelmäßig überarbeiteten Straßenbaumliste im Jahr 2022 Zukunftsbäume für die Stadt ausgewählt, die dem Aspekt der Klimarobustheit Rechnung tragen [103].

Unter allergologischen Gesichtspunkten muss in diese Frage der Aspekt des allergenen Potenzials von Stadtgrün einbezogen werden (z. B. [104]). So wäre es sowohl unter gesundheitlichen als auch unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll, weiterhin Bäume anzupflanzen, auf deren Pollen eine Vielzahl von Menschen in Deutschland allergisch reagiert [105] oder im Laufe des Lebens eine Allergie entwickeln könnte [106]. Ebenso wenig sinnvoll wäre es, auf bisher gebietsfremde und an hohe Lufttemperaturen angepasste Bäume zu setzen, sofern sie ein hohes allergenes Potenzial haben, wie dies zum Beispiel für den Olivenbaum gilt [60]. Um dem allergologischen Aspekt von Stadtgrün Rechnung zu tragen, empfahlen Bergmann et al. [107] 2012 Städten und Kommunen, bei der Bepflanzung des öffentlichen Raums Rücksicht auf Pollenallergiker zu nehmen und veröffentlichten eine Liste von in Berlin ansässigen Baum- und Straucharten, die für Neuanpflanzungen aus allergologischer Sicht geeignet sind. Diese Liste wird derzeit überarbeitet und sollte mit der GALK-Liste der Zukunftsbäume zusammengeführt werden.

3.4 Veränderungen in der Arbeitswelt gerecht werden

Obwohl eine genaue Einschätzung der gesundheitlichen, aber auch wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels auf die Arbeitswelt derzeit nicht möglich ist, müssen die mit dem Klimawandel verbundenen Gefährdungen für die Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz im globalen Arbeitsschutz verstärkt adressiert werden (Abbildung 5). So müssen angepasste Bewertungsmaßstäbe und Schutzmaßnahmen bereitgestellt werden. Dies erfolgte beispielsweise für Auswirkungen einer erhöhten UV-Strahlenbelas-

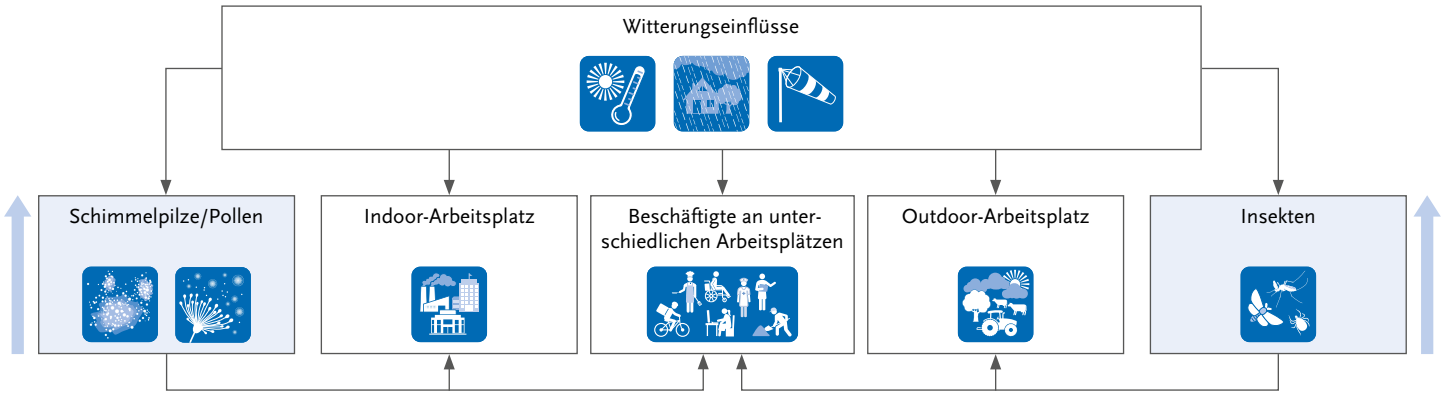


Abbildung 5
Einfluss von Faktoren des Klimawandels auf Umwelt und damit auf die Beschäftigten an unterschiedlichen Arbeitsplätzen: Exemplarisch sind nur einige Allergenquellen, bei denen mit einer Zunahme der Exposition zu rechnen ist, dargestellt
Quelle: Eigene Darstellung nach Raulf, Hut, Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

Die mit dem Klimawandel verbundenen Gefährdungen für die Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz müssen im globalen Arbeitsschutz verstärkt adressiert werden.

tung bei Outdoorarbeiten. Diesem Umstand wurde durch eine neue Berufskrankheit (BK5103) Rechnung getragen, indem bestimmte UV-bedingte Hautkrebsarten anerkannt werden können [108]. Neben klimawandelbedingten Stressoren wie Hitze und UV-Strahlung sollten auch Infektionskrankheiten und Allergien im Fokus stehen.

Wichtig ist aber auch, betroffene Berufsgruppen über mögliche Auswirkungen des Klimawandels adäquat zu informieren und gezielt Präventionsmaßnahmen zu implementieren. Zur Prävention insbesondere allergischer Erkrankungen gehört eine frühzeitige und zielgenaue Diagnostik, die laufend an die veränderten Bedingungen angepasst wird. Die Forschung ist gefordert, Wissen hinsichtlich Art, Verbreitung und Auswirkung z. B. von Allergenen zu erweitern, das als Grundlage für präventive Maßnahmen dienen kann. Der Klimawandel erreicht alle gesellschaftlichen Bereiche und macht auch vor der Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz nicht halt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Insbesondere Inhalationsallergien, aber auch andere Erkrankungen aus dem atopischen Formenkreis, haben weltweit zugenommen und ein epidemisches Ausmaß erreicht. Klimaveränderungen haben durch Einfluss auf Flora und Fauna Auswirkungen auf das Vorkommen von Aeroallergenen. So können polysensibilisierte Pollenallergikerinnen und Pollenallergiker aufgrund von Veränderungen der Blühperiode von Pflanzen heute fast ganzjährig unter Allergiesymptomen leiden. Ausführlichere Informationen zum Themenkomplex finden sich in Abschnitt 2.1 Klimawandel und (neue) Pollenallergene.

Der Auslösung allergischer Symptome geht immer die Phase der Sensibilisierung durch Allergenexposition voraus. Umweltfaktoren wie Luftschadstoffe und Klima beeinflussen die Allergenität von Pollen durch chemische Modifikationen und Aneinanderlagerung von Allergenen (Agglomeration), die zur Bildung neuer Allergene (Neoallergene) führen können [109, 110]. Auf der anderen Seite können Umweltschadstoffe durch Schädigung der Haut- und Schleimhautbarriere die Penetration von Allergenen in Haut und Schleimhäute fördern, das Immunsystem modulieren, Inflammation hervorrufen und dadurch die individuelle Empfindlichkeit zur Entwicklung von Allergien beeinflussen [109]. Ausführlichere Informationen zu diesen Themenkomplexen finden sich in Abschnitt 2.3 Neurodermitis und Klimawandel und Abschnitt 2.4 Luftschadstoffe.

Symptome allergischer Reaktionen werden durch freigesetzte Mediatoren ausgelöst. Die Stärke der Reaktion hängt von der Allergenkonzentration ab und damit einerseits von der Pollenkonzentration, andererseits von der Menge und der Struktur der aus Pollen freigesetzten Allergene, die wiederum auch von klimatischen Bedingungen abhängen [49]. Deutlich wird dies bei einem Phänomen, das als Gewitterasthma Bedeutung erlangt hat. Menschen mit Heuschnupfen können in solchen außergewöhnlichen Situationen schwere Asthmaanfälle erleiden, die vorher nicht bestanden [111]. Einen detaillierteren Einblick in das Phänomen Gewitterasthma gibt die Infobox dieses Artikels.

Unwetter und Starkregen führen zu Überschwemmungen; feuchte Wohnungen sind prädestiniert für Schimmelpilz- und Bakterienwachstum. Gefährdet sind nicht nur Menschen, die feuchte Wohnungen/Häuser bewohnen, sondern auch Beschäftigte, die mit Sanierung und Abriss

beschäftigt sind [112, 113]. Klimaveränderungen führen zu Veränderungen in Flora, Fauna und Funga, d. h. der in einem Gebiet vorkommenden Pilze. Zunehmende Temperaturen begünstigen das Wachstum von Pflanzen und Pilzen sowie die Verbreitung von Tieren, darunter auch Schädlingen, die ansonsten in wärmeren Regionen beheimatet sind. Bestandteile von Insekten werden insbesondere in warmen Klimaregionen als relevante Aeroallergene angesehen. Ausführlichere Informationen dazu finden sich in Abschnitt 2.2 Klimawandel und (neue) berufliche Inhalationsallergene.

Für eine zielführende allergologische Diagnostik müssen alle Allergene, auch die, die bislang in Deutschland eine untergeordnete Rolle spielen und/oder gespielt haben, zur Verfügung stehen. Derzeit stellt die Allergen-Immuntherapie immer noch die einzige Behandlungsmöglichkeit dar, die darauf zielt, bei Patientinnen und Patienten individuell Toleranz gegen Allergene zu induzieren. Dabei müssen Allergenextrakte dem jeweiligen Sensibilisierungsprofil gegebenenfalls angepasst werden. Da Klimaveränderungen dazu führen können, dass Pflanzen neue Allergene exprimieren oder sich die quantitative Zusammensetzung der Allergene ändert, muss sichergestellt werden, dass in Extrakten die relevanten Allergene in adäquater Konzentration enthalten sind. Ausführlichere Darlegungen zum Thema Sensibilisierungsmonitoring und weitere Handlungsempfehlungen finden sich in Abschnitt 3 Handlungsempfehlungen.

Der Klimawandel beeinflusst unsere Gesundheit und unser Leben zunehmend. Politik und Gesellschaft und insbesondere die Mitarbeitenden im Gesundheitswesen sind aufgefordert, Erkenntnisse aus wissenschaftlicher Grundlagenforschung, Umwelt-, Arbeitswelt- und Krankheitsmonitoring in ihrem Handeln strikt zu berücksichtigen.

Korrespondenzadresse
Dr. med. Conny Höflich
Umweltbundesamt
Fachgebiet II 1.5 – Umweltmedizin und gesundheitliche Bewertung
Corrensplatz 1
14195 Berlin
E-Mail: conny.hoeflich@uba.de

Zitierweise
Bergmann KC, Brehler R, Endler C, Höflich C, Kespohl S et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Deutschland.
J Health Monit 8(S4): 82–110.
DOI 10.25646/11648

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter: www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis
Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021 – 06/2024).

Interessenkonflikt
Randolf Brehler gibt Vortragstätigkeiten (ALK, Allergopharma, Almirall, Astra Zeneca, Behring, Bencard, GlaxoSmithKline, HAL Allergie, Leti, MedUpdate, Merck, Novartis, Omnicuris, Oto-Rhino-Laryngologischer Verein, Sanofi, Stallergenes, Thermo-Fischer) und Beratertätigkeiten (Allergopharma, Astra Zeneca, GlaxoSmithKline, HAL Allergie, Leti, Lofarma, Novartis) an. Die anderen Autorinnen und Autoren geben an, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Beiträge der Autorinnen und Autoren
Alle Autorinnen und Autoren haben vergleichbare Beiträge geleistet und sind nach alphabetischer Reihenfolge aufge-

listet. Abstract: Redaktionsteam; Allergien in Zeiten des Klimawandels: Redaktionsteam; Begriffsdefinitionen Allergie, Sensibilisierung, Atopie: Bergmann KC, Thamm R; Häufigkeiten allergischer Erkrankungen und Sensibilisierungen: Standl M, Thamm R; Allergie-Trigger Pollen: Bergmann KC, Werchan B; Klimawandel und Allergien, Direkte und indirekte Effekte: Endler C; Infobox, Extremwetter und Asthma: Endler C; Veränderungen in der phänologischen Entwicklung Pollen-produzierender Pflanzen: Endler C; Einfluss des Klimawandels auf die Pflanzenproduktivität: Endler C; Änderungen im zeitlichen Auftreten von Pollen: Bergmann KC; Veränderungen von Pollenkonzentrationen: Bergmann KC; Veränderungen im Spektrum allergener Pollen: Bergmann KC, Höflich C; Klimawandel und (neue) berufliche Inhalationsallergene tierischen, pflanzlichen und mikrobiellen Ursprungs: Kespohl S, Raulf M; Neurodermitis und Klimawandel: Traidl-Hoffmann C; Luftschadstoffe, Einfluss der Luftverschmutzung auf Pollenkörner, Aeroallergene und allergische Reaktionen: Plaza M, Traidl-Hoffmann C; Pollen- und Schimmelpilzsporenmonitoring: Höflich C, Werchan B; Allergie- und Sensibilisierungsmonitoring: Höflich C, Thamm R; Städteplanung unter allergologischen Gesichtspunkten: Höflich C; Veränderungen in der Arbeitswelt gerecht werden: Kespohl S, Raulf M; Zusammenfassung und Ausblick: Brehler R

Das Redaktionsteam bestand aus Karl-Christian Bergmann, Randolf Brehler, Christina Endler und Conny Höflich. Die Zusammenführung der Referenzen erfolgte durch Roma Thamm. Die Koordination der Arbeit erfolgte durch Conny Höflich.

Danksagung

Das RKI-Koordinationsteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Allergieinformationsdienst (2023) Wie entsteht eine Allergie? www.allergieinformationsdienst.de/immunsystem-allergie/entstehung-von-allergien.html (Stand: 02.05.2023)
2. Klimek L, Vogelberg C, Werfel T (Hrsg) (2018) Weißbuch Allergie in Deutschland. Springer Berlin, Heidelberg
3. Langer S, Horn J, Kluttig A et al. (2020) Häufigkeit von Asthma bronchiale und Alter bei der Erstdiagnose – Erste Ergebnisse der NAKO Gesundheitsstudie. Bundesgesundheitsbl 63(4):397–403
4. Von Mutius E, Vercelli D (2010) Farm living: Effects on childhood asthma and allergy. Nat Rev Immunol 10(12):861–868
5. Robert Koch-Institut (2019) Gesundheitsmonitoring. www.rki.de/gesundheitsmonitoring (Stand: 26.04.2023)
6. Heidemann C, Scheidt-Nave C, Beyer AK et al. (2021) Gesundheitliche Lage von Erwachsenen in Deutschland – Ergebnisse zu ausgewählten Indikatoren der Studie GEDA 2019/2020-EHIS. J Health Monit 6(3):3–27. https://edoc.rki.de/handle/176904/8749 (Stand: 12.06.2023)
7. Thamm R, Hey I, Thamm M (2018) Epidemiologie allergischer Erkrankungen: Prävalenzen und Trends in Deutschland. In: Klimek L, Vogelberg C, Werfel T (Hrsg) Weißbuch Allergie in Deutschland. Springer Berlin, Heidelberg, S. 27–51
8. Haftenberger M, Laussmann D, Ellert U et al. (2013) Prävalenz von Sensibilisierungen gegen Inhalations- und Nahrungsmittelallergene: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). Bundesgesundheitsbl 56(5-6):687–697

9. Thamm R, Poethko-Müller C, Hüther A et al. (2018) Allergische Erkrankungen bei Kindern und Jugendlichen in Deutschland – Querschnittergebnisse aus KiGGS Welle 2 und Trends. J Health Monit 3(3):3–18. https://edoc.rki.de/handle/176904/5765 (Stand: 12.06.2023)

10. Schmitz R, Ellert U, Kalcklösch M et al. (2013) Patterns of sensitization to inhalant and food allergens – findings from the German Health Interview and Examination Survey for Children and Adolescents. Int Arch Allergy Immunol 162(3):263–270

11. Thamm R, Poethko-Müller C, Thamm M (2018) Allergische Sensibilisierungen im Lebensverlauf – Ergebnisse der KiGGS-Kohorte. J Health Monit 3(1):71–75. https://edoc.rki.de/handle/176904/3039 (Stand: 12.06.2023)

12. Laussmann D, Steppuhn H, Haftenberger M et al. (2015) Monitoring allergenspezifischer Sensibilisierungen bei Erwachsenen in Deutschland. In: Rieger MA, Hildenbrand S (Hrsg) Dokumentation der 55. Wissenschaftlichen Jahrestagung der DGAUM (Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin eV). DGAUM, Tübingen, S. 194

13. Beug HJ (2004) Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München

14. Bergmann KC, Werchan M, Werchan B (2020) Allergy to tree-of-heaven pollen in Germany: Detection by positive nasal provocation. Allergo J Int 29:126–128

15. Hertig E, Hunger I, Kaspar Ott I et al. (2023) Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023. J Health Monit 8(S3):7–35. https://edoc.rki.de/handle/176904/11074 (Stand: 12.06.2023)

16. Deutscher Wetterdienst (2023) Klimaatlas. www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html (Stand: 20.01.2023)

17. Deutscher Wetterdienst (2022) Nationaler Klimareport; 6. überarbeitete Auflage. DWD. www.dwd.de/nationalerklimareport (Stand: 20.01.2023)

18. Puhlmann H, Albrecht A, Wolf T (2021) Klimaänderungen: Auswirkungen auf den Wasserhaushalt von Wäldern. Wasserwirtschaft 111(6):33–36

19. Thober S, Marx A, Boeing F (2018) Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. Helmholz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Leipzig. www.ufz.de/export/data/2/207531_HOKLIM_Brosch%C3%BCre_final.pdf (Stand: 12.06.2023)

20. Blöschl G, Hall J, Viglione A et al. (2019) Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature 573(7772):108–111

21. Chatelier J, Chan S, Tan JA et al. (2021) Managing exacerbations in thunderstorm asthma: Current insights. J Inflamm Res 14:4537–4550

22. Idrose NS, Dharmage SC, Lowe AJ et al. (2020) A systematic review of the role of grass pollen and fungi in thunderstorm asthma. Environ Res 181:108911

23. Lõhmus M, Lind T, Maclachlan L et al. (2022) Combined exposure to birch pollen and thunderstorms affects respiratory health in Stockholm, Sweden – A time series analysis. Int J Environ Res Public Health 19(10):5852

24. Gehrig R, Gassner M, Schmid-Grendelmeier P (2015) *Alnus* × *spaethii* pollen can cause allergies already at Christmas. Aerobiologia 31:239–247

25. Werchan M, Werchan B, Bergmann KC (2018) Deutscher Pollenflugkalender 4.0 – Update mit Messdaten von 2011 bis 2016. Allergo J 27(3):18–20

26. Deutscher Wetterdienst (2023) Phänologie – Daten Deutschland. www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/daten_deutschland/daten_deutschland_node.html (Stand: 12.06.2023)

27. Ettinger AK, Chamberlain CJ, Morales-Castilla I et al. (2020) Winter temperatures predominate in spring phenological responses to warming. Nat Clim Chang 10(12):1137–1142

28. Wayne P, Foster S, Connolly J et al. (2002) Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO_2-enriched atmospheres. Ann Allergy Asthma Immunol 88:279–282

29. Ziska LH, Caulfield FA (2000) Rising CO_2 and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), a known allergy-inducing species: Implications for public health. Aust J Plant Physiol 27:893–898

30. Albertine JM, Manning WJ, Dacosta M et al. (2014) Projected carbon dioxide to increase grass pollen and allergen exposure despite higher ozone levels. PLoS ONE 9(11):e111712

31. Wohlgemuth T, Nussbaumer A, Burkart A et al. (2016) Muster und treibende Kräfte der Samenproduktion bei Waldbäumen. Schweiz Z Forstwes 167(6):316–324

32. Hacket-Pain A, Bogdziewicz M (2021) Climate change and plant reproduction: Trends and drivers of mast seeding change. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 376(1839):20200379

33. Nussbaumer A (2020) Mast behaviour in European forest tree species: Triggers, inhibitors, and resource dynamics mechanisms. Doctoral dissertation: ETH Zurich. www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/480828 (Stand: 12.06.2023)

34. Haase D, Hellwig R (2022) Effects of heat and drought stress on the health status of six urban street tree species in Leipzig, Germany. Trees For People 8:100252

35. Meier M, Vitasse Y, Bugmann H et al. (2021) Phenological shifts induced by climate change amplify drought for broad-leaved trees at low elevations in Switzerland. Agric For Meteorol 307:108485

36. Obladen N, Dechering P, Skiadaresis G et al. (2021) Tree mortality of European beech and Norway spruce induced by 2018–2019 hot droughts in central Germany. Agric For Meteorol 307:108482

37. Landgraf M, Gehlsen J, Rumbou A et al. (2016) Absterbende Birken im urbanen Grün Berlins – Eine Studie zur Virusinfektion. In: Dujesiefken D (Hrsg) Jahrbuch der Baumpflege 2016. Haymarket, Braunschweig, S. 276–283

38. Pfaar O, Bastl K, Berger U et al. (2017) Defining pollen exposure times for clinical trials of allergen immunotherapy for pollen-induced rhinoconjunctivitis – An EAACI position paper. Allergy 72(5):713–722

39. Estrella N, Menzel A, Kramer U et al. (2006) Integration of flowering dates in phenology and pollen counts in aerobiology: Analysis of their spatial and temporal coherence in Germany (1992–1999). Int J Biometeorol 51(1):49–59

40. Kolek F, Plaza MDP, Leier-Wirtz V et al. (2021) Earlier flowering of *Betula pendula* Roth in Augsburg, Germany, due to higher temperature, NO(2) and urbanity, and relationship with *Betula* spp. Pollen Season. Int J Environ Res Public Health 18(19):10325

41. Menzel A, Yuan Y, Matiu M et al. (2020) Climate change fingerprints in recent European plant phenology. Glob Chang Biol 26(4):2599–2612

42. Simoleit A, Wachter R, Gauger U et al. (2016) Pollen season of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and temperature trends at two German monitoring sites over a more than 30-year period. Aerobiologia 32:489–497

43. Fernandez Rodriguez S, Adams-Groom B, Tormo Molina R et al. (2012) Temporal and spatial distribution of *Poaceae* pollen in areas of southern United Kingdom, Spain and Portugal. The 5th European Symposium on Aerobiology. Krakow, Poland 3–7 September 2012. Alergologia Immunologia 9(2–3):153

44. Siroux V, Ballardini N, Soler M et al. (2018) The asthma-rhinitis multimorbidity is associated with IgE polysensitization in adolescents and adults. Allergy 73(7):1447–1458

45. Bergmann KC, Buters J, Karatzas K et al. (2020) The development of birch pollen seasons over 30 years in Munich, Germany – An EAACI Task Force report. Allergy 75(12):3024–3026

46. Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (2023) Pollen- und Pilzsporenflug in Deutschland 2001 – 2022. www.pollenstiftung.de/pollen-im-fokus/pollenflug-rueckblick.html (Stand: 20.01.2023)

47. Ziello C, Sparks TH, Estrella N et al. (2012) Changes to airborne pollen counts across Europe. PLoS ONE 7(4):e34076

48. Buters J, Prank M, Sofiev M et al. (2015) Variation of the group 5 grass pollen allergen content of airborne pollen in relation to geographic location and time in season. J Allergy Clin Immunol 136(1):87-95.e6

49. Maya-Manzano JM, Oteros J, Rojo J et al. (2022) Drivers of the release of the allergens Bet v 1 and Phl p 5 from birch and grass pollen. Environ Res 214(Pt 3):113987

50. Höflich C, Balakirski G, Hajdu Z et al. (2016) Potential health risk of allergenic pollen with climate change associated spreading capacity: Ragweed and olive sensitization in two German federal states. Int J Hyg Environ Health 219(3):252–260

51. Villalba M, Rodriguez R, Batanero E (2014) The spectrum of olive pollen allergens. From structures to diagnosis and treatment. Methods 66(1):44–54

52. Rojo J, Oteros J, Picornell A et al. (2021) Effects of future climate change on birch abundance and their pollen load. Glob Chang Biol 27(22):5934–5949

53. Buters J, Alberternst B, Nawrath S et al. (2015) *Ambrosia artemisiifolia* (ragweed) in Germany – Current presence, allergological relevance and containment procedures. Allergo J Int 24:108–120

54. Starfinger U (2007) Aktionsprogramm Ambrosia – Lässt sich die Ausbreitung der Beifußblättrigen Ambrosie in Deutschland noch verhindern? UMID 03/2007:27–30

55. Arbes SJ Jr, Gergen PJ, Elliott L et al. (2005) Prevalences of positive skin test responses to 10 common allergens in the US population: Results from the third National Health and Nutrition Examination Survey. J Allergy Clin Immunol 116(2):377–383

56. Höflich C (2018) Pollen-assoziierte allergische Erkrankungen in Zeiten des Klimawandels – Neue Daten zur Entwicklung in Deutschland. UMID 01/2018:5–14

57. Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (2011) Ambrosia – Erfahrungsbericht.

58. Scala E, Villalta D, Uasuf CG et al. (2018) An atlas of IgE sensitization patterns in different Italian areas. A multicenter, cross-sectional study. Eur Ann Allergy Clin Immunol 50(5):217–225

59. Lake IR, Jones NR, Agnew M et al. (2017) Climate change and future pollen allergy in Europe. Environ Health Perspect 125(3):385–391

60. Burbach GJ, Heinzerling LM, Edenharter G et al. (2009) GA(2) LEN skin test study II: Clinical relevance of inhalant allergen sensitizations in Europe. Allergy 64(10):1507–1515

61. Höflich C, Balakirski G, Hajdu Z et al. (2021) Management of patients with seasonal allergic rhinitis: Diagnostic consideration of sensitization to non-frequent pollen allergens. Clin Transl Allergy 11(8):e12058

62. Bergmann KC, Werchan M, Werchan B (2020) Allergie auf Pollen des Götterbaumes in Deutschland: Nachweis mittels positiver nasaler Provokation. Allergo J 29(4):62–63

63. Marti-Garrido J, Corominas M, Castillo-Fernandez M et al. (2020) Allergy to *Ailanthus altissima* pollen: A local allergen to consider. J Investig Allergol Clin Immunol 30(6):452–454

64. Prenzel F, Treudler R, Lipek T et al. (2022) Invasive growth of *Ailanthus altissima* trees is associated with a high rate of sensitization in atopic patients. J Asthma Allergy 15:1217–1226

65. Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023) Landwirtschaftliche Betriebe. www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Tabellen/ausgewaehlte-merkmale-zv.html (Stand: 02.06.2023)

66. Seitz AT, Reschke R, Simon JC et al. (2019) Lepidopterismus – Eichenprozessionspinnerdermatits – Vom seltenen Allergen zur sich ausbreitenden Erkrankung. Allergologie 42:79–82

67. Beermann S, Dobler G, Faber M et al. (2023) Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Vektor- und Nagetier-assoziierte Infektionskrankheiten. J Health Monit 8(S3): 36–66. https://edoc.rki.de/handle/176904/11075 (Stand: 12.06.2023)

68. Fischer J, Lupberger E, Hebsaker J et al. (2017) Prevalence of type I sensitization to alpha-gal in forest service employees and hunters. Allergy 72(10):1540–1547

69. Kespohl S, Riebesehl J, Gruner J et al. (2022) Impact of climate change on wood and woodworkers – *Cryptostroma corticale* (sooty bark disease): A risk factor for trees and exposed employees. Front Public Health 10:973686

70. Rando RJ, Kwon CW, Lefante JJ (2014) Exposures to thoracic particulate matter, endotoxin, and glucan during post-Hurricane Katrina restoration work, New Orleans 2005 – 2012. J Occup Environ Hyg 11(1):9–18

71. Decuyper II, Green BJ, Sussman GL et al. (2020) Occupational allergies to cannabis. J Allergy Clin Immunol Pract 8(10):3331–3338

72. Sussman GL, Beezhold DH, Cohn JR et al. (2020) Cannabis: An emerging occupational allergen? Ann Work Expo Health 64(7):679–682

73. Sander I, Keller C, Czibor C et al. (2020) Unusual allergen in a butcher with respiratory symptoms. Allergol Select 4:105–109

74. Kuske M, Berndt K, Spornraft-Ragaller P et al. (2020) Occupational allergy to phytase: Case series of eight production workers exposed to animal feed additives. J Dtsch Dermatol Ges 18(8):859–865

75. Bieber T, Traidl-Hoffmann C, Schappi G et al. (2020) Unraveling the complexity of atopic dermatitis: The CK-CARE approach toward precision medicine. Allergy 75(11):2936–2938

76. Dittlein DC, Gilles-Stein S, Hiller J et al. (2016) Pollen and UV-B radiation strongly affect the inflammasome response in human primary keratinocytes. Exp Dermatol 25(12):991–993

77. Werfel T, Heratizadeh A, Niebuhr M et al. (2015) Exacerbation of atopic dermatitis on grass pollen exposure in an environmental challenge chamber. J Allergy Clin Immunol 136(1):96–103.e9

78. Paller AS, Spergel JM, Mina-Osorio P et al. (2019) The atopic march and atopic multimorbidity: Many trajectories, many pathways. J Allergy Clin Immunol 143(1):46–55

79. Breitner-Busch S, Mücke HG, Schneider A et al. (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft. J Health Monit 8(S4):111–131. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

80. Senechal H, Visez N, Charpin D et al. (2015) A review of the effects of major atmospheric pollutants on pollen grains, pollen content, and allergenicity. ScientificWorldJournal 2015:940243

81. Cuinica LG, Abreu I, Da Silva J (2014) In vitro exposure of *Ostrya carpinifolia* and *Carpinus betulus* pollen to atmospheric levels of CO, O_3 and SO_2. Environ Sci Pollut Res Int 21(3):2256–2262

82. Cuinica LG, Abreu I, Esteves Da Silva J (2014) Effect of air pollutant NO_2 on *Betula pendula*, *Ostrya carpinifolia* and *Carpinus betulus* pollen fertility and human allergenicity. Environ Pollut 186:50–55

83. Ghiani A, Bruschi M, Citterio S et al. (2016) Nitration of pollen aeroallergens by nitrate ion in conditions simulating the liquid water phase of atmospheric particles. Sci Total Environ 573:1589–1597

84. Ghiani A, Aina R, Asero R et al. (2012) Ragweed pollen collected along high-traffic roads shows a higher allergenicity than pollen sampled in vegetated areas. Allergy 67(7):887–894

85. Plaza MP, Alcazar P, Oteros J et al. (2021) Atmospheric pollutants and their association with olive and grass aeroallergen concentrations in Cordoba (Spain). Environ Sci Pollut Res Int 27(36):45447–45459

86. Gilles S, Behrendt H, Ring J et al. (2012) The pollen enigma: Modulation of the allergic immune response by non-allergenic, pollen-derived compounds. Curr Pharm Des 18(16):2314–2319

87. Gruijthuijsen YK, Grieshuber I, Stocklinger A et al. (2006) Nitration enhances the allergenic potential of proteins. Int Arch Allergy Immunol 141(3):265–275

88. Schiavoni G, D'Amato G, Afferni C (2017) The dangerous liaison between pollens and pollution in respiratory allergy. Ann Allerg Asthma Immunol 118(3):269–275

89. D'Amato M, Cecchi L, Annesi-Maesano I et al. (2018) News on climate change, air pollution, and allergic triggers of asthma. J Investig Allergol Clin Immunol 28(2):91–97

90. D'Amato G, Chong-Neto HJ, Monge Ortega OP et al. (2020) The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens. Allergy 75(9):2219–2228

91. Bergmann KC, Berger M, Klimek L et al. (2021) Nonpharmacological measures to prevent allergic symptoms in pollen allergy: A critical review. Allergol Select 5:349–360

92. Buters J, Clot B, Galán C et al. (2022) Automatic detection of airborne pollen: An overview. Aerobiologia

93. Hirst JM (1952) An automatic volumetric spore trap. Ann Appl Biol 39(2):257–265

94. Polling M, Sin M, De Weger LA et al. (2022) DNA metabarcoding using nrITS2 provides highly qualitative and quantitative results for airborne pollen monitoring. Sci Total Environ 806(Pt 1):150468

95. VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft – Normenausschuss (Hrsg) (2019) Richtlinie VDI 4252 Blatt 4: Bioaerosole und biologische Agenzien – Ermittlung von Pollen und Sporen in der Außenluft unter Verwendung einer volumetrischen Methode für ein Messnetz zu allergologischen Zwecken. Beuth, Berlin

96. Werchan B, Werchan M, Mucke HG et al. (2017) Spatial distribution of allergenic pollen through a large metropolitan area. Environ Monit Assess 189(4):169

97. Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (2023). Pollenmessstationen in Deutschland. www.pollenstiftung.de/pollenvorhersage/pollenmessstationen-in-deutschland.html (Stand: 04.01.2023)

98. Deutscher Wetterdienst (2022) Pollenflug-Gefahrenindex. www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrenindizespollen/gefahrenindexpollen.html (Stand: 19.11.2022)

99. Werchan B, Werchan M, Röseler S et al. (2021) Die Wochenpollenvorhersage der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) – Ein Hilfsmittel für Pollenallergiker und deren behandelnde Ärzte in Deutschland. Allergologie 44:920–926

100. Fachübergreifender Arbeitskreis „Bundesweites Pollenmonitoring“ (2019) Perspektiven für ein bundesweites Pollenmonitoring in Deutschland. Bundesgesundheitsbl 62(5):652–661

101. World Health Organization (2017) WHO guidelines on ethical issues in public health surveillance. WHO, Geneva. www.who.int/publications/i/item/who-guidelines-on-ethical-issues-in-public-health-surveillance (Stand: 26.04.2023)

102. Robert Koch-Institut (2021) Gesundheitsstudien des RKI. www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Studien/Studien_node.html. (Stand: 26.04.2023)

103. Bund deutscher Baumschulen e.V., Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V. (2022) Zukunftsbäume für die Stadt. BdB e.V., GALK e.V. https://epaper.galk.de/index.html#0 (Stand: 18.11.2022)

104. Carinanos P, Grilo F, Pinho P et al. (2019) Estimation of the allergenic potential of urban trees and urban parks: Towards the healthy design of urban green spaces of the future. Int J Environ Res Public Health 16(8):1357

105. Zuberbier T, Lötvall J, Simoens S et al. (2014) Economic burden of inadequate management of allergic diseases in the European Union: A GA(2)LEN review. Allergy 69(10):1275–1279

106. Markevych I, Ludwig R, Baumbach C et al. (2020) Residing near allergenic trees can increase risk of allergies later in life: LISA Leipzig study. Environ Res 191:110132

107. Bergmann KC, Zuberbier T, Augustin J et al. (2012) Klimawandel und Pollenallergie: Städte und Kommunen sollten bei der Bepflanzung des öffentlichen Raums Rücksicht auf Pollenallergiker nehmen. Allergo J 21(2):103–108

108. Diepgen TL, Brandenburg S, Aberer W et al. (2014) Skin cancer induced by natural UV-radiation as an occupational disease – Requirements for its notification and recognition. J Dtsch Dermatol Ges 12(12):1102–1106

109. Reinmuth-Selzle K, Kampf CJ, Lucas K et al. (2017) Air pollution and climate change effects on allergies in the anthropocene: Abundance, interaction, and modification of allergens and adjuvants. Environ Sci Technol 51(8):4119–4141

110. Zhao F, Elkelish A, Durner J et al. (2016) Common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.): Allergenicity and molecular characterization of pollen after plant exposure to elevated NO_2. Plant Cell Environ 39(1):147–164

111. D'Amato G, Annesi-Maesano I, Cecchi L et al. (2019) Latest news on relationship between thunderstorms and respiratory allergy, severe asthma, and deaths for asthma. Allergy 74(1):9–11

112. American Thoracic Society (2017) Mold-specific concerns associated with water damage for those with allergies, asthma, and other lung diseases. Am J Respir Crit Care Med 196(7):P13–P14

113. Johanning E, Auger P, Morey PR et al. (2014) Review of health hazards and prevention measures for response and recovery workers and volunteers after natural disasters, flooding, and water damage: Mold and dampness. Environ Health Prev Med 19(2):93–99

Impressum

Journal of Health Monitoring
www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber
Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur
Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen
Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter, Dr. Kirsten Kelleher,
Dr. Livia Ryl, Simone Stimm

Satz
WEBERSUPIRAN.berlin, Alexander Krönke

Bildnachweis
Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis
Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.

Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S4)
DOI 10.25646/11649.2
Robert Koch-Institut, Berlin

Susanne Breitner-Busch[1, 2], Hans-Guido Mücke[3], Alexandra Schneider[2], Elke Hertig[4]

[1] Ludwig-Maximilians-Universität München
Institut für medizinische Informationsverarbeitung, Biometrie und Epidemiologie (IBE)
[2] Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt
Institut für Epidemiologie
[3] Umweltbundesamt, Berlin
Abteilung Umwelthygiene
[4] Universität Augsburg
Medizinische Fakultät

Eingereicht: 22.12.2022
Akzeptiert: 31.03.2023
Veröffentlicht: 06.09.2023

Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft

Abstract

Hintergrund: Die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen reichen von kurzfristigen Gesundheitseinschränkungen über Krankenhauseinweisungen bis hin zu Todesfällen. Der Klimawandel führt zu einer Zunahme von Luftverschmutzung.

Methode: Dieser Beitrag adressiert, auf der Basis ausgewählter Fachliteratur, den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Luftschadstoffen, die gesundheitlichen Effekte von Luftschadstoffen sowie deren Modifikation durch die Lufttemperatur, mit einem Fokus auf Deutschland.

Ergebnisse: Schlechte Luftqualität erhöht das Risiko für viele Erkrankungen. Durch den Klimawandel kommt es unter anderem zu einer Zunahme von Perioden extremer Hitze mit gleichzeitig erhöhten Konzentrationen von Luftschadstoffen. Die Wechselwirkungen zwischen Lufttemperaturen und Luftschadstoffen sowie ihre kombinierten Auswirkungen auf den Menschen sind noch nicht ausreichend erforscht. Zum Schutz der Gesundheit sind Grenz-, Ziel- und Richtwerte von besonderer Bedeutung.

Schlussfolgerungen: Maßnahmen zur Minderung von Luftschadstoffen und klimawirksamen Gasen müssen verstärkt umgesetzt werden. Als ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung der Luftqualität sollten in Europa strengere Grenzwerte zur Luftreinhaltung festgelegt werden. Notwendige Präventions- und Anpassungsmaßnahmen sollten in Deutschland zeitnah, auch in Hinblick auf klimaresiliente und nachhaltige Gesundheitssysteme, vorangetrieben werden.

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

LUFTSCHADSTOFFE · GESUNDHEIT · HERZ-KREISLAUF-ERKRANKUNGEN · ATEMWEGSERKRANKUNGEN · LUFTTEMPERATUR

1. Einleitung

Im Verlauf ihres Lebens sind Menschen unterschiedlichen Risikofaktoren ausgesetzt, die sich negativ auf ihre Gesundheit auswirken können. Einige dieser Risikofaktoren wie z. B. Rauchen und Bewegungsmangel sind durch Änderungen der Verhältnisse (z. B. Werbeverbote für Tabak, Verfügbarkeit von Fahrradwegen), aber auch durch das eigene Verhalten (über den individuellen Lebensstil) beeinflussbar. Andere Risikofaktoren, wie zum Beispiel die Luftverschmut-

Dieser Artikel wurde korrigiert (siehe Corrigendum Seite 131), Stand 06.12.2023

zung, sind dagegen hauptsächlich durch Veränderungen der Verhältnisse beeinflussbar, z. B. durch die gesetzliche Festlegung maximal zulässiger Immissionskonzentrationen. Verhaltensänderungen einzelner Menschen können aber ebenfalls dazu beitragen, z. B. durch die bewusste Entscheidung für umweltfreundliche Mobilität, Energie- und Heizsysteme.

Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) leben etwa 99 % der Weltbevölkerung in Gebieten, in denen die Luftqualitätsstandards nicht den empfohlenen Richtwerten entsprechen. Laut dem neuesten Bericht „State of the Global Air" [1], der auf den Ergebnissen der Global Burden of Disease (GBD)-Studie beruht [2], wird geschätzt, dass die Luftverschmutzung im Jahr 2019 für einen von neun Todesfällen weltweit verantwortlich war. Luftverschmutzung zählt somit zu den vier wichtigsten Risikofaktoren für die globale Krankheitslast, nur übertroffen von hohem Blutdruck, Rauchen und schlechter Ernährung. Infobox 1 erläutert die für Deutschland wesentlichen Luftschadstoffe und ihre Quellen.

Betrachtet man die Belastung unter Berücksichtigung des neuen, im Jahr 2021 veröffentlichten Richtwertes der WHO für $PM_{2.5}$-Feinstaub in Höhe von 5 µg/m³ (Jahresmittelwert), so sind nahezu 100 % der Bevölkerung Deutschlands $PM_{2.5}$-Feinstaubwerten oberhalb des Richtwertes ausgesetzt (Infobox 2). Basierend auf den Ergebnissen aus der GBD-Studie liegt für Deutschland die Krankheitslast durch Luftverschmutzung an zehnter Stelle der Risikofaktoren für den Menschen und gilt auch hier als wichtigster umweltbedingter Risikofaktor [2].

Die Luftqualität unterliegt generell wetter- und witterungsabhängigen sowie saisonalen und zwischenjährlichen Schwankungen. Die mittleren Luftschadstoffkonzentrationen weisen bei Feinstaub (Particulate Matter, PM) und bei Stickstoffoxiden (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, NO_x) ein deutliches Stadt-Land-Gefälle auf. Die höchsten Belastungen treten in der Nähe ihres Entstehungsortes, in Ballungsräumen und an stark verkehrsbelasteten Orten auf. Windarme Wetterlagen und Inversionswetterlagen, gekennzeichnet durch eine Umkehr des üblichen Temperaturrückgangs mit der Höhe und damit Unterbindung des vertikalen Luftaustausches, können zu einer starken Anreicherung der Luftschadstoffe in der unteren Atmosphäre führen, wohingegen Niederschlagsereignisse meist zu einer Verringerung der Belastung durch Auswaschungsprozesse führen. Hohe Ozonkonzentrationen liegen in Mitteleuropa vor allem in den Frühlings- und Sommermonaten vor, oft in Kombination mit hohen Lufttemperaturen und starker UV-Strahlung, da Ozon photochemisch unter solarer Einstrahlung gebildet wird (s. auch Baldermann et al. [3] in diesem Sachstandsbericht). Sommerliche, strahlungsreiche Hochdruckwetterlagen stehen daher meist in Verbindung mit hoher Ozon- und Temperaturbelastung [4]. Bei Ozon nehmen die Konzentrationen in der Regel Richtung suburbaner und ruraler Räume hin zu. Die höchsten Belastungen entstehen durch chemische Reaktionen der Vorläuferstoffe des Ozons, den Stickstoffoxiden und flüchtigen Kohlenwasserstoffen, bis auf Ausnahmen außerhalb der Ballungsräume in einiger Entfernung von den Quellen. Die Vorläuferstoffe des Ozons werden mit dem Wind aus der Stadt transportiert, wo sie Zeit haben, zu Ozon zu reagieren. Zusätzlich wird in den Innenstädten ein Großteil des Ozons durch die Reaktion mit Stickstoffmonoxid (NO) aus Autoabgasen sofort wieder abgebaut. Deshalb ist die Ozon-

Infobox 1
Wesentliche gesundheitsrelevante Luftschadstoffe in der Außenluft in Deutschland

Partikuläre Luftschadstoffe: Diese können natürlichen Ursprungs sein oder durch menschliches Handeln erzeugt werden. Eine wichtige Quelle für partikuläre Luftschadstoffe ist der Kfz-Verkehr. Neben den sogenannten Auspuffemissionen gibt es zudem noch das Aufwirbeln von Staub, Verschleiß von Bremsen und Reifen sowie Abrieb von Straßenoberflächen. Daneben stellen auch Schornsteine von Industrieanlagen und Kraftwerken, Heizanlagen in Haushalten sowie die Landwirtschaft wichtige Quellen dar. Natürliche Quellen für Partikel sind Emissionen aus Vulkanen und Meeren, Wald- und Buschfeuer sowie bestimmte biogene Aerosole, wie zum Beispiel Viren.

Um eine einheitliche Klassifizierung zu ermöglichen, werden die in der Luft vorhandenen Partikel anhand ihres aerodynamischen Durchmessers häufig in folgende Größenkategorien unterteilt:

- Gesamtstaub (Total Suspended Particles, TSP): Masse aller im Gesamt-Schwebstaub enthaltenen Partikel, dieser Wert wird heute nicht mehr routinemäßig gemessen und reguliert
- Inhalierbarer Feinstaub: Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer (<10 µm) ist (abgekürzt PM_{10})
- Grobe Partikel (Coarse PM): Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser <10 µm, aber größer als 2,5 Mikrometer (> 2,5 µm) ist ($PM_{10-2.5}$)
- Lungengängiger Feinstaub: Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser <2,5 µm ($PM_{2.5}$)
- Ultrafeine Partikel (UFP): Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser <0,1 µm bzw. kleiner als 100 Nanometer ist ($PM_{0.1}$)

Konzentrationen von größeren Partikeln (PM_{10}, $PM_{10-2.5}$ und $PM_{2.5}$) werden üblicherweise als Partikelmasse bestimmt. UFP hingegen tragen zur Feinstaubmasse sehr wenig bei, bestimmen umgekehrt aber die Anzahl der Partikel in der Umgebungsluft. Die geeignete Messgröße für UFP ist deshalb ihre Anzahl pro Volumeneinheit (z. B. Anzahl pro Kubikzentimeter, cm^3).

Gasförmige Luftschadstoffe: O_3, bodennahes Ozon, wird nicht durch eine Schadstoffquelle freigesetzt, sondern entsteht im Wesentlichen als Folgeprodukt komplexer Umwandlungsprozesse. An diesen Mechanismen sind hauptsächlich flüchtige organische Verbindungen und Stickoxide beteiligt; die Sonneneinstrahlung liefert die Energie für die Bildung von bodennahem Ozon. Daher wird vor allem im Sommer und in anthropogen belasteten Luftmassen besonders viel Ozon erzeugt.

Stickstoffdioxid (NO_2) ist ein Spurengas in der Atmosphäre und entsteht als Nebenprodukt bei natürlichen und anthropogenen Verbrennungsprozessen. Die Hauptquellen in der Außenluft sind Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen (für Kohle, Öl, Gas, Holz, Abfälle). Neben der Rolle als Vorläufersubstanz für Ozon ist NO_2 in der Atmosphäre auch an der Bildung von Feinstaubpartikeln beteiligt.

Kohlenmonoxid (CO) ist ein Gas, das bei der unvollständigen Verbrennung von Brenn- und Treibstoffen entsteht. Es bildet sich, wenn bei Verbrennungsprozessen zu wenig Sauerstoff zur Verfügung steht. Entsprechend sind der Straßenverkehr und Feuerungsanlagen die Hauptquellen. Kohlenmonoxid ist auch in Tabakrauch in signifikanten Mengen vorhanden.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind Substanzen, die durch unvollständige Verbrennungsprozesse von organischen Materialien (z. B. Holz, Kohle oder Öl) oder in Lebensmitteln (z. B. beim Grillen oder Braten) entstehen. Hauptquellen sind industrielle Prozesse der Mineralölverarbeitung, der Kohlechemie, der Metallverarbeitung, oder der Energieerzeugung.

belastung in Innenstädten, wo viele Autos fahren, deutlich niedriger als am Stadtrand und in den angrenzenden ländlichen Gebieten.

Luftschadstoffe und klimawirksame Gase sind unterschiedliche Substanzen, weisen aber größtenteils die gleichen Quellen auf. Die Emission von Treibhausgasen (vor

Unter Fortschreiten des Klimawandels könnten die gesundheitlichen Risiken durch Luftverschmutzung weiter zunehmen.

Infobox 2
Was sind WHO-Richtwerte?

Eine zentrale Aufgabe der WHO ist die wissenschaftliche Ableitung und Veröffentlichung von Richtwerten zum Schutz der menschlichen Gesundheit: Richtwerte sind numerische Werte, die als Konzentration eines Schadstoffs in einem bestimmten Medium (z. B. Luft, Wasser) mit einer Mittelungszeit (Zeitraum, für den der Richtwert gültig ist) ausgedrückt werden. Es wird davon ausgegangen, dass unterhalb dieser Konzentration keine oder nur minimale gesundheitsschädliche Wirkungen auftreten. Dies gilt unter Berücksichtigung der Genauigkeit und Sicherheit aktuell verwendeter physikalischer, epidemiologischer und medizinischer Mess- und Analyseverfahren, weshalb das Auftreten etwaiger Wirkungen unterhalb eines Richtwertes derzeit nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Richtwerte sind nicht rechtsverbindlich. Vielmehr stellen diese Empfehlungen zum Schutz der menschlichen Gesundheit dar.

allem Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan und Lachgas) ist eine wesentliche Ursache der globalen Klimaerwärmung, die Umwelt und Gesundheit nachhaltig negativ beeinflusst [5, 6]. Der Anstieg der mittleren Lufttemperatur verändert die atmosphärische Zirkulation, das kurzzeitige Wetter- und Witterungsgeschehen, wie auch langfristig das Klima. Änderungen atmosphärischer Transport- und Durchmischungsprozesse nehmen Einfluss auf die physikalisch-chemische Prozesse und auf den Zustand der Luftqualität. Seit Beginn dieses Jahrhunderts wurde festgestellt, dass lufthygienisch relevante Extremwetterereignisse vor allem während der Sommerhalbjahre in Europa und auch in Deutschland zugenommen und sich verstärkt haben. Hierzu zählen insbesondere Perioden extremer Hitze mit gleichzeitig erhöhten Konzentrationen von Luftschadstoffen wie Ozon, die gesundheitliche Effekte auslösen können [7, 8]. Aufgrund des Zusammenhangs der Ozonbildungsprozesse mit der Temperatur wird unter Fortgang des Klimawandels ein Anstieg der Ozonkonzentrationen erwartet, vor allem in Projektionen mit einem starken Klimawandel und nur eingeschränkter Reduktion der Vorläufersubstanzen. Zudem kann sich die Belastung durch Feinstaub (PM_{10}) erhöhen, dessen Emissionen sowohl aus anthropogenen als auch natürlichen Quellen stammen können. Der anthropogene Anteil wird durch Verbrennungsprozesse der Industrie und des Verkehrs emittiert. Natürliche Prozesse wie Vegetationsbrände [9] und die Windverfrachtung staubtrockenen Bodens während langanhaltender sommerlicher Trockenheit, wie im Dürresommer 2018 [10], können eine erhebliche Zusatzbelastung der Gesamt(fein)staubemission sein.

In diesem Artikel folgen ein Überblick über die gesundheitlichen Effekte von Luftschadstoffen und deren Wechselwirkung mit der Lufttemperatur, sowie eine Einschätzung zu den relevanten Grenz-, Ziel- und Richtwerten. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für Public Health gesammelt. Die Analyse erfolgt auf Basis der aktuellen Fachliteratur im Rahmen eines narrativen Reviews.

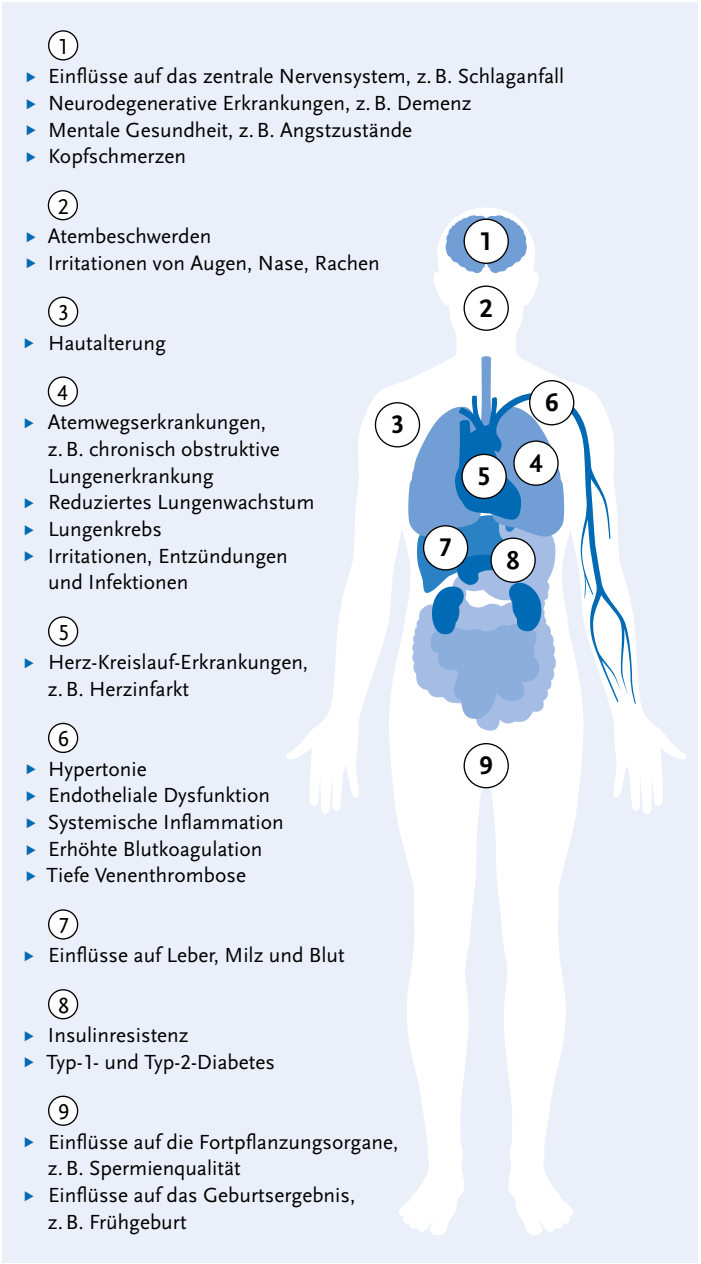
2. Gesundheitliche Effekte von Luftschadstoffen

2.1 Ein Überblick

Obwohl Luftschadstoffe primär über die Atemwege in den Körper gelangen und damit zunächst ein Gesundheitsrisiko für den Atemtrakt und die Lunge naheliegt, zeigt die Forschung der vergangenen Jahrzehnte, dass das größte attributable Risiko von Luftschadstoffen beim Herz-Kreislauf-System liegt. Die Auswirkungen reichen von kurzfris-

Abbildung 1
Gesundheitseffekte von Luftschadstoffen
Quelle: Eigene Darstellung nach European Environment Agency [15] und Thurston et al. [12]

Die Luftschadstoffbelastung der Außenluft stellt eines der größten umweltbedingten Gesundheitsrisiken dar.



tigen Gesundheitseinschränkungen über Krankenhauseinweisungen bis hin zu Todesfällen. Diese können akut bei hohen Konzentrationen oder als Konsequenz von Langzeitbelastungen auftreten [11].

Schlechte Luftqualität erhöht das Risiko für Herzerkrankungen, Lungenerkrankungen und Atemwegsinfektionen, Typ-2-Diabetes und weitere gesundheitliche Probleme (Abbildung 1). Die Exposition gegenüber Luftschadstoffen während der Schwangerschaft kann zu einem erhöhten Risiko für Frühgeburten und niedrigem Geburtsgewicht führen. Luftschadstoffe wurden auch mit Asthma und Infektionen der unteren Atemwege bei Kindern in Verbindung gebracht. Diese gesundheitlichen Auswirkungen führen zu Schul- und Arbeitsausfällen, chronischen Krankheiten und Todesfällen. Insgesamt verkürzt die Exposition gegenüber Luftschadstoffen die Lebenserwartung [12–14]. Die Luftverschmutzung ist der mit großem Abstand wichtigste umweltbedingte Risikofaktor für die menschliche Gesundheit.

In Bezug auf die gesundheitlichen Auswirkungen unterscheidet man in der Regel zwischen kurzfristigen Wirkungen hoher Luftschadstoffkonzentrationen, d. h. Wirkungen, die in unmittelbarer zeitlicher Nähe zur Exposition, also innerhalb weniger Tage auftreten, und denjenigen Wirkungen, die langfristig aus einer erhöhten (chronischen) Belastung durch Luftschadstoffe resultieren (z. B. jährliche Durchschnittsbelastungen am Wohnort oder Arbeitsplatz). Kurzfristige Erhöhungen von $PM_{2.5}$ erhöhen das relative Risiko für akute Herz-Kreislauf-Ereignisse um 1–3 % innerhalb weniger Tage. Längerfristige Expositionen über mehrere Jahre erhöhen dieses Risiko in größerem Ausmaß (ca. 10 %), was teilweise auf die Entstehung und/oder Verschlimmerung von kardiometabolischen Erkrankungen wie

Bluthochdruck und Diabetes mellitus zurückzuführen ist [16]. Durch die Verringerung der Luftverschmutzung könnte die Krankheitslast durch Schlaganfälle, Herzerkrankungen, Lungenkrebs und sowohl chronische als auch akute Atemwegserkrankungen einschließlich Asthma deutlich reduziert werden.

Vor allem kurzzeitig erhöhte Expositionen bergen womöglich für gesunde Menschen ein eher geringes Risiko, doch können subklinische Gesundheitseffekte durchaus als plausibler Vorläufer von schwerwiegenden oder tödlich verlaufenden Ereignissen bei suszeptiblen (empfänglichen bzw. empfindlichen) Personen angesehen werden, während wiederholte Expositionen bzw. eine hohe Langzeitbelastung zur Entwicklung von kardiovaskulären und respiratorischen Erkrankungen beitragen können. Die mit der Luftverschmutzung verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen mögen aus medizinischer Sicht z. B. im Vergleich zu anderen Risikofaktoren wie Rauchen oder Übergewicht gering erscheinen, aber auf ganze Bevölkerungen bezogen, sind die Auswirkungen immens.

Trotz der guten Studienlage konnte bisher keine untere Wirkungsschwelle identifiziert werden. Das heißt, dass selbst bei niedriger Exposition die gesundheitlichen Auswirkungen mit ansteigender Luftschadstoffkonzentration zunehmen. Dies wurde unter anderem in einer großen Studie mit mehreren Millionen Teilnehmenden in den USA untersucht. Die Ergebnisse zeigten eine lineare Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen $PM_{2.5}$ und Mortalität auch weit unterhalb des derzeitigen US-Grenzwertes von 12 µg/m³ [17]. Das bedeutet somit im Umkehrschluss: Jede Reduktion der Belastung ist mit einem Gesundheitsgewinn verbunden – sowohl kurz- als auch langfristig [18].

Potenzielle Mechanismen

Luftschadstoffe werden mit der Atmung über die Atemwege in die Lunge transportiert. Insbesondere $PM_{2.5}$-Feinstaub gelangt bis in die kleinsten Atemwege und Lungenbläschen. UFP können außerdem über den Blutkreislauf zu anderen Organen gelangen (Infobox 3). Zusammengefasst können die Partikel-Effekte durch verschiedene Mechanismen

Infobox 3
Eindringtiefe von Luftschadstoffen

Partikuläre Luftschadstoffe: Entsprechend der Größenverteilung, d. h. entlang ihres aerodynamischen Durchmessers, können Aerosolpartikel unterschiedlich tief in den menschlichen Organismus eindringen. Partikel mit aerodynamischen Durchmessern > 10 µm (Grobstäube) werden bei gesunden Erwachsenen fast ausschließlich in den oberen Atemwegen (Mund, Nase, Rachen) abgeschieden und stellen demzufolge ein geringes Risiko dar. Hingegen kann die Fraktion PM_{10} bis in den oberen Bereich der Lunge vordringen und wird daher auch als inhalierbarer Feinstaub bezeichnet. Die noch feineren Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 2.5 µm ($PM_{2.5}$) gelangen bis in die Bronchien und Bronchiolen. Daher wird $PM_{2.5}$ auch als lungengängiger Feinstaub bezeichnet. UFP können bis zum gasaustauschenden Bereich (Lungenbläschen oder Alveolen) vordringen und vermögen auch in den Blutkreislauf, der den benötigten Sauerstoff im gesamten menschlichen Organismus verteilt, überzugehen. Diese Partikel können somit zu unterschiedlichen Organen des Körpers transportiert werden [20].

Gasförmige Luftschadstoffe: Alle gasförmigen Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid dringen in den gesamten Atemtrakt ein und belasten dort die Schleimhäute. Vor allem Ozon kann bei tiefer und häufiger Einatmung bis in die tiefsten Abschnitte der Lunge gelangen.

Tabelle 1
Mögliche Mechanismen, die den beobachteten Zusammenhang zwischen Luftschadstoffen und Erkrankungen erklären
Quelle: Eigene Darstellung nach Schulz et al. [23]

Primäre Pfade → → →	Ablaufende Mechanismen → → →	Mögliche Folgen
Inhalierte Partikel rufen persistierenden oxidativen Stress und Abwehrprozesse in Form von schwachen chronischen Entzündungsreaktionen hervor	Freisetzung von Botenstoffen im Lungengewebe, die zu einer systemischen Entzündungsreaktion führt (unter Einbezug der angeborenen und erworbenen Immunabwehr)	Störung der Endothelfunktion; Bildung von Thromben; Fortschreiten von atherosklerotischen Läsionen; eingeschränkte Lungenfunktion; Verschlimmerung von Asthma und COPD; DNA-Schäden; Förderung von Karzinogenese und Metastasierung
Lungengängige Partikel oder sekundäre Mediatoren stimulieren Reflex-Rezeptoren auf der Oberfläche der Lungenbläschen	Ungleichgewicht des vegetativen Nervensystems und somit Beeinflussung der autonomen Kontrolle des Herzens durch Begünstigung des sympathischen Tonus über afferente Nervenbahnen; Oxidation; Alteration von zentralen Signalwegen der Zelldifferenzierung und des Wachstums; mitochondriale Dysfunktion	Einfluss auf die Herzleistung; Herzrhythmusstörungen; Bronchokonstriktion; Schädigungen der Atemwegsschleimhaut; Einschränkung des Selbstreinigungsmechanismus der Bronchien
Direkte Translokation: UFP oder Partikelkomponenten durchdringen die Lungenbläschen und gelangen in den Blutstrom	Direkter Einfluss auf Organe oder Blutbestandteile	Beeinflussung der Viskosität des Blutes; Lokale Entzündungsreaktionen: erhöhte Entzündungswerte und verstärkte Gerinnungsneigung im Blut; Zentrales Nervensystem: Auswirkungen auf den Stoffwechsel und Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinde Achsenaktivierung

COPD = chronisch obstruktive Lungenerkrankung (chronic obstructive pulmonary disease), DNA = Desoxyribonukleinsäure, UFP = ultrafeine Partikel

verursacht werden, die – allein oder gemeinsam – das Risiko besonders für Herz-Kreislauf-Erkrankungen und kardiovaskuläre Ereignisse erhöhen (Tabelle 1) [16, 19–22].

Zudem kann Luftschadstoffexposition zu epigenetischen Veränderungen führen, z. B. zu Veränderungen in der DNA-Methylierung (chemische Abänderung an Grundbausteinen der Erbsubstanz einer Zelle), die denen des epigenetischen Alterns ähneln [16, 21]. Weiterhin konnten Studien zeigen, dass Luftschadstoffe die sogenannten „epigenetic ageing clocks“ beschleunigen können und so die Differenz zwischen chronologischem Alter und dem sogenannten Methylierungsalter vergrößern, wobei eine größere Differenz mit niedrigerer Lebenserwartung und einem höheren Risiko für altersabhängige Erkrankungen assoziiert ist [16, 21].

Die in Tabelle 1 aufgezeigten Pfade und Mechanismen sind teilweise voneinander abhängig und können kreuzreagieren (z. B. „feed-forward“ oder gegenseitige Verstärkung). Insgesamt wird angenommen, dass direkte Effekte von Partikeln kardiovaskuläre Ereignisse innerhalb von wenigen Stunden auslösen können. Daneben gibt es zunehmend Hinweise, dass Partikel die Entstehung und Progression von atherosklerotischen Läsionen mit befördern, ein möglicher Mechanismus für die beobachteten Langzeiteffekte [20].

Interaktive Effekte von Luftverschmutzung und Temperatur müssen beachtet werden.

Suszeptible Bevölkerungsgruppen

Potenzielle Faktoren für die besondere Suszeptibilität (Empfänglichkeit bzw. Empfindlichkeit) gegenüber Luftschadstoffen sind das Lebensalter (Säuglinge, Kinder und ältere Menschen), das Rauchverhalten und andere Lebensstilfaktoren. Insbesondere der Sozialstatus ist ein Faktor, der bei der Untersuchung von Gesundheitseffekten durch Luftverschmutzung eine wichtige Rolle spielt. Er korreliert mit weiteren sozialen und persönlichen Faktoren ebenso wie mit den Umweltbedingungen am Wohnort. Auch besondere Lebensphasen wie Schwangerschaft tragen zur erhöhten Suszeptibilität bei, wobei hier sowohl die werdenden Mütter als auch das noch ungeborene Leben betroffen sind. Ein weiterer wichtiger Faktor sind chronische Vorerkrankungen: So ist die Sensibilität insbesondere bei Kindern und älteren Menschen mit chronischen Atemwegserkrankungen (z. B. Asthma bronchiale, chronisch obstruktive Lungenerkrankung) sowie mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen erhöht und schlägt sich an einzelnen Tagen und vor allem an Episoden mit hoher Außenluftbelastung (z. B. Smog-Situationen) in plötzlicher Verschlimmerung der Grunderkrankungen nieder [20, 23].

2.2 Gesundheitliche Effekte von Luftschadstoffen in Interaktion mit hoher Lufttemperatur

Wie oben erwähnt, begünstigt eine hohe Lufttemperatur zusammen mit intensiver Sonneneinstrahlung die Bildung bodennahen Ozons durch die Reaktion von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen. Zudem kann sich die Feinstaubbelastung durch Entstehung von sogenannten sekundären Aerosolen erhöhen [24]. An heißen Tagen besteht außerdem eine geringe Luftzirkulation, daher können vor allem in den Städten erzeugte Luftschadstoffe nicht abgeführt werden und verbleiben in höherer Konzentration in der Luft. Während Hitzeperioden mit länger anhaltender Trockenheit kommt es zudem häufig zu Waldbränden, die in erheblichem Maß zu hohen Schadstoffkonzentrationen, insbesondere von Feinstaub, beitragen können [25].

Ozon und Feinstaub (PM_{10} und $PM_{2.5}$) sind daher besonders gesundheitsrelevante Luftschadstoffe während trocken-heißer sommerlicher Hochdruckwetterlagen. Ergebnisse gesundheitsbezogener Studien weisen auf die Evidenz des Einflusses von Luftschadstoffen bei gleichzeitig auftretender Hitze hin, dies betrifft vor allem Menschen in städtischen Ballungsräumen [26, 27]. Die expositionsabhängige Ausprägung gesundheitlicher Wirkungen (parallele Einzelwirkung vs. Kombinationseffekte auf Morbidität und Mortalität) kann wegen der Effektmodifikation und des Zusammenwirkens der Einzelfaktoren untereinander derzeit noch nicht abschließend beurteilt werden und bedarf weiterer Studien [5, 26].

Bisher wurden hohe Lufttemperaturen bzw. Hitzeereignisse und Luftschadstoffe meist getrennt voneinander betrachtet. So haben zwar die meisten Studien bisher die gesundheitlichen Auswirkungen verschiedener Luftschadstoffe untersucht, indem Lufttemperatur als potenzieller Störfaktor berücksichtigt wurde und umgekehrt. Die Wechselwirkungen zwischen hohen Lufttemperaturen, Hitzeereignissen und Luftschadstoffen sowie ihre kombinierten Auswirkungen auf den Menschen sind jedoch noch nicht ausreichend erforscht, insbesondere unter Berücksichtigung des globalen Klimawandels [28, 29].

Effekte von kurzzeitiger Exposition gegenüber Luftschadstoffen auf die Mortalität – Effektmodifikation durch Hitze

Die meisten der bislang veröffentlichten Studien haben die Veränderung der Auswirkungen von Luftschadstoffen durch die Temperatur untersucht. Die Mehrzahl dieser Studien konnte zeigen, dass hohe Temperaturen die Effekte von Ozon oder Feinstaub auf die (ursachenspezifische) Mortalität verstärken. Allerdings weisen einige Studien auch auf stärkere Effekte von Ozon und Feinstaub bei gleichzeitig niedrigeren Temperaturen hin bzw. zeigen keine Wirkungsänderung der Luftschadstoffe durch Temperatur [30].

Effekte von kurzzeitiger Exposition gegenüber Hitze auf die Mortalität – Effektmodifikation durch Luftschadstoffe

Im Gegensatz dazu sind die Studien, die untersuchen, ob Luftverschmutzung die Auswirkungen der Temperatur modifiziert, immer noch begrenzt [29, 31]. So wurden z. B. im Nachgang des Hitzesommers 2003 die unabhängigen Effekte und synergistische Wirkung (d. h. ein gemeinsamer Effekt, der größer ist als die Summe der Einzeleffekte) von Hitzewellen (s. auch Winklmayr et al. [32] in diesem Sachstandsbericht) und Luftschadstoffen auf die tägliche Sterblichkeit in neun europäischen Städten untersucht [8]. Es konnte gezeigt werden, dass das Sterberisiko durch Hitze durch gleichzeitig erhöhte Konzentrationen von Ozon und PM_{10}-Feinstaub verstärkt wurde. Besonders ältere Menschen waren dabei gefährdet. Eine neue systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse kam zu ähnlichen Ergebnissen: Es wurde eine signifikante Veränderung des Hitzeeffektes auf die Gesamt- bzw. die natürliche Mortalität durch Ozon als auch PM_{10}-Feinstaub beobachtet, mit stärkeren Hitzeeffekten an Tagen mit hoher Luftschadstoffbelastung [31]. Diese Effekte wurden auch anhand einer in acht deutschen Städten durchgeführten Vergleichsstudie zur temperaturabhängigen Schwellenwertbestimmung grundsätzlich bestätigt. Danach erscheint bei niedriger Lufttemperatur der Ozoneinfluss auf die Gesamtmortalität größer, hingegen dominiert der Temperatureinfluss während Hitze gleichermaßen wie Ozon [33].

In einer weiteren europäischen Studie konnte zudem gezeigt werden, dass sowohl hohe Lufttemperaturen die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die Gesamtsterblichkeit an natürlichen Todesursachen und auf die Sterblichkeit an Herz-Kreislauf-Erkrankungen modifizieren als auch hohe Konzentrationen von Feinstaub, UFP und Ozon den Effekt der Lufttemperatur verstärken [6].

Kombinierte Effekte von kurzzeitiger Exposition gegenüber Luftschadstoffen und Hitze auf die Mortalität

Eine US-amerikanische Studie zeigte kürzlich, dass das Sterberisiko in Kalifornien im Zeitraum 2014–2019 an Tagen mit extrem hohen Temperaturen um etwa 6 % und an Tagen mit hohen $PM_{2.5}$-Feinstaubkonzentrationen um etwa 5 % anstieg [34]. An Tagen, an denen sowohl extreme Hitze als auch hohe Luftverschmutzung herrschten, stieg das Risiko um 21 % an und war damit höher als die Summe der Einzeleffekte von extremer Temperatur und $PM_{2.5}$ allein. Katsouyanni et al. [35] stellten ebenfalls fest, dass eine hohe Lufttemperatur den ungünstigen Einfluss von PM_{10}-Feinstaub auf die Gesundheit verstärkt: In einer warmen Klimaregion bewirkt ein Feinstaubanstieg von 10 µg/m³ eine Zunahme der Gesamtmortalität um 0,8 %, hingegen beträgt die Zunahme in kühlerem Klima nur 0,3 %.

Kurzzeitige Exposition gegenüber Luftschadstoffen und Hitze – Wirkungen auf die Morbidität

In den allermeisten der bisher durchgeführten Studien wurden Auswirkungen des Zusammenspiels von Lufttemperatur und Luftschadstoffen auf die Mortalität untersucht. Dahingegen gibt es nur wenige Studien, die interaktive Effekte bzw. Wirkungsänderungen auf Krankenhauseinweisungen oder andere Morbiditätsendpunkte untersuchten. So zeigten z. B. Studien aus Australien, China und den USA, dass sowohl hohe Feinstaubkonzentrationen die Effekte von Hitze auf kardiorespiratorische Krankenhauseinweisungen verstärkten als auch hohe Temperaturen die Auswirkungen von Feinstaub beeinflussten; bei Hitze waren die Partikel-Effekte allgemein stärker [36]. Eine neue Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse zu respiratorischen Krankenhauseinweisungen zeigte auch stärkere PM_{10}-Feinstaub- und Ozon-Effekte bei gleichzeitig hohen Temperaturen [37]. Allerdings zeigten weitere Studien stärkere Effekte von Luftschadstoffen bei gleichzeitig niedrigeren Temperaturen bzw. keine Interaktion oder Effektmodifikation [36].

Andere Studien fanden zudem z. B. Hinweise auf interaktive Effekte von Temperatur und Feinstaub, Ruß bzw. Ozon auf die Lungenfunktion, die Herzrate und Herzratenvariabilität, den Blutdruck und Marker für die Endothelfunktion [29].

Zusammenspiel von chronischer Belastung durch Luftschadstoffe und Lufttemperatur

Während in den letzten Jahren eine zunehmende Zahl von Arbeiten die gesundheitliche Wirkung des Zusammenhangs von kurzzeitiger Exposition gegenüber erhöhter Lufttemperatur und Luftschadstoffen untersuchte, gibt es bislang nur sehr wenige Studien zum Zusammenspiel von chronischer Belastung durch Luftschadstoffe und Lufttemperatur. Angesichts des sich wandelnden Klimas ist es aber von Bedeutung, auch die längerfristigen Auswirkungen, wie jährliche Durchschnittstemperaturen, und ihr Zusammenspiel mit einer chronischen Luftschadstoffbelastung zu verstehen.

In einer Studie zur Assoziation zwischen chronischer Feinstaubbelastung und Mortalität in 207 amerikanischen Städten zeigte sich, dass die $PM_{2.5}$-Effekte besonders in solchen Städten ausgeprägt waren, in denen es im Jahresdurchschnitt wärmer war [38]. Ähnliche Effekte wurden in weiteren US-amerikanischen Studien beschrieben [29].

3. Grenz-, Ziel- und Richtwerte im aktuellen Kontext der Luftsituation in Deutschland

Richtwerte stellen Empfehlungen von Expertinnen und Experten aus den relevanten Fachbereichen dar und basieren auf der aktuellen Studienlage zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen (s. Luftqualitätsleitlinie der WHO), während Grenzwerte in Verordnungen und Vorschriften festgelegt sind. Zusätzlich gibt es Zielwerte, die nach Möglichkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums eingehalten werden müssen. Die rechtlichen Grundlagen zum Schutz der menschlichen Gesundheit durch Luftreinhaltung und Beurteilung der Luftqualität sind in Infobox 4 zusammengefasst. Für PM_{10} liegt der Grenzwert bei 50 µg/m³ im Tagesmittel (mit 35 zulässigen Überschreitungen im Jahr) und bei 40 µg/m³ im Jahresmittel. Für die Feinstaubfraktion $PM_{2.5}$ ist der Grenzwert 25 µg/m³ im Jahresmittel. Für den gesundheitlich ebenfalls relevanten Ul-

Infobox 4
Rechtliche Grundlagen der Luftreinhaltung und Beurteilung der Luftqualität

Die Basis für das Recht über die Luftreinhaltung und Luftqualitätsüberwachung ist durch internationale Abkommen, Richtlinien auf europäischer Ebene und durch Umsetzung dieser in deutsches Recht geschaffen worden. Die Staaten der Europäischen Union (EU) haben einheitliche Regelungen zur Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität ausgearbeitet. Grundlage hierfür ist die Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa vom Mai 2008. Mit der 39. Verordnung (39. BImSchV – Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom August 2010) zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG – Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge) wurde die EU-Richtlinie in deutsches Recht umgesetzt. Für die verschiedenen Luftschadstoffe sind Grenz- und Zielwerte verbindlich festgelegt. Zur Vergleichbarkeit der durchgeführten Messungen in den einzelnen Mitgliedstaaten enthält die Richtlinie verbindliche Regelungen über Lage und Mindestzahl der Probenahmestellen, einheitliche Kriterien zu Datenqualitätszielen und Berechnungsvorschriften und Vorgaben für den Bericht der Luftqualitätsbeurteilung an die EU-Kommission. Referenzmethoden zur Beurteilung der verschiedenen Schadstoffkonzentrationen sind hier gleichfalls festgelegt. Jeder Mitgliedstaat berichtet der EU-Kommission zum 30. September eines Jahres über die Luftqualität des Vorjahrs.
Quelle: Wichmann-Fiebig et al. [40]

trafeinstaub existieren derzeit weder Richt-, Ziel- noch Grenzwerte. Für NO_2 liegen die Grenzwerte bei 200 µg/m³ im Stundenmittel (18 zulässige Überschreitungen im Jahr) und bei 40 µg/m³ im Jahresmittel. Für Ozon darf der maximale 8-Stunden-Wert eines Tages an höchstens 25 Tagen pro Kalenderjahr, gemittelt über drei Jahre, den Wert von 120 µg/m³ überschreiten. Langfristig sollen die maximalen 8-Stundenmittel den Wert von 120 µg/m³ gar nicht mehr überschreiten.

Auf Basis zahlreicher neuer wissenschaftlicher Studien hat die WHO 2021 ihre bisherigen Luftqualitätsleitlinie aus 2005 überarbeitet und mit neuen, globalen Empfehlungen und Richtwerten veröffentlicht [39]. Danach wurden für PM_{10} Richtwerte von 45 µg/m³ im Tagesmittel und von 15 µg/m³ im Jahresmittel abgeleitet, für $PM_{2.5}$ 15 µg/m³ im Tagesmittel und 5 µg/m³ im Jahresmittel. Für NO_2 empfiehlt die neue WHO-Leitlinie einen Richtwert von 25 µg/m³ im Stundenmittel und 10 µg/m³ im Jahresmittel. Die Richtwerte für Ozon liegen bei 100 µg/m³ als höchstes 8-Stundenmittel eines Tages und von maximal 60 µg/m³ als Mittelwert der sechs Monate mit den höchsten Ozonkonzentrationen.

Um den unterschiedlichen Stand der Luftreinhaltung in den verschiedenen Ländern der Erde zu berücksichtigen, wurden auch sogenannte „Interim targets“, also orientierende Zwischenziele empfohlen, über die ein schrittweiser Entwicklungsprozess bis hin zur Erreichung der genannten WHO-Richtwerte eingeleitet werden sollte. Aus den Empfehlungen der neuen WHO-Luftqualitätsleitlinie folgt auch, dass die derzeit in Deutschland gemessenen Luftschadstoffkonzentrationen sowie die noch gültigen Grenzwerte zu hoch angesetzt sind, um einen effektiven Gesundheitsschutz der Bevölkerung zu gewährleisten. Abbildung 2 zeigt den prozentualen Anteil an Überschreitungen der WHO-Richtwerte und Zwischenziele für die Luftschadstoffe Feinstaub (PM_{10} und $PM_{2.5}$), Ozon, NO_2, SO_2 und CO an den deutschen Messstationen im Jahr 2020. Verschiedene Maßnahmen wurden in Deutschland in der Vergangenheit ergriffen, um die Luftschadstoffkonzentrationen zu verringern. Dabei steht die angestrebte Verminderung und

Abbildung 2
Anteil von Luftqualitätsmessstellen in Deutschland, deren Messwerte des Jahres 2020 die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte (AQG-Level) und Zwischenziele (2021) überschritten (dunkelblaue Ringanteile)
Quelle: Eigene Darstellung nach Wichmann-Fiebig et al. [40]

	$PM_{2.5}$		PM_{10}		O_3		NO_2		SO_2	CO
Schadstoff	**Jahresmittel**	**Tagesmittel**[1]	**Jahresmittel**	**Tagesmittel**[1]	**Hochsaison**[2]	**8-Stunden-mittel**[1]	**Jahresmittel**	**Tagesmittel**[1]	**Tagesmittel**[1]	**Tagesmittel**[1]
Interim Target 1	0 % >35 µg/m³	0 % >75 µg/m³	0 % >70 µg/m³	0 % >150 µg/m³	3 % >100 µg/m³	0,4 % >160 µg/m³	1 % >40 µg/m³	0 % >120 µg/m³	0 % >125 µg/m³	0 % >7 mg/m³
Interim Target 2	0 % >25 µg/m³	0 % >50 µg/m³	0 % >50 µg/m³	0 % >100 µg/m³	100 % >70 µg/m³	95 % >120 µg/m³	22 % >30 µg/m³	21 >50 µg/m³	2 % >50 µg/m³	Kein Interim Target
Interim Target 3	0 % >15 µg/m³	2 % >37.5 µg/m³	0 % >30 µg/m³	0 % >75 µg/m³	Kein Interim Target		51 % >20 µg/m³	Kein Interim Target	Kein Interim Target	Kein Interim Target
Interim Target 4	14 % >10 µg/m³	78 % >25 µg/m³	5 % >20 µg/m³	7 % >50 µg/m³	Kein Interim Target		Kein Interim Target		Kein Interim Target	Kein Interim Target
AQG-Level	99 % >5 µg/m³	99,5 % >15 µg/m³	36 % >15 µg/m³	16 % >45 µg/m³	100 % >60 µg/m³	99,6 % >100 µg/m³	83 % >10 µg/m³	76 % >25 µg/m³	2 % >40 µg/m³	0 % >4 mg/m³

[1] 99. Perzentile [2] 8-Stundenmittelwerte eines Tages in den sechs aufeinander folgenden Monaten mit den höchsten Ozonkonzentrationen (hier: April – September)
AQG-Level = WHO-Luftqualitätsrichtwerte

Vermeidung von schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt durch Luftschadstoffe im Fokus. Mit Einhaltung der vorgeschriebenen Immissionswerte und Emissionshöchstmengen soll die Schadstoffbelastung vermindert werden, wobei die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte keinen vollständigen Gesundheitsschutz bedeutet. Alle EU-Mitgliedstaaten sind dazu verpflichtet, im Falle von Überschreitungen der EU-Luftqualitätsgrenzwerte aus dem Jahr 2008 nach Gemeinschaftsrecht Luftreinhalte- und Aktionspläne aufzustellen. Die Ergebnisse der aktuellen Luftqualitätsauswertung 2021 zeigen für Deutschland, dass zum Schutz der Gesundheit die Luftschadstoffbelastung durch Feinstaub, NO_2 und Ozon weiter großräumig verringert werden muss [3].

4. Bedeutung für Public Health und Handlungsempfehlungen

Die Klimaprojektionen zeigen, dass der Klimawandel sehr wahrscheinlich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zu einer Zunahme von Extremwetterereignissen und zu Veränderungen im Bereich der Luftschadstoffe mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen wird (s. auch Hertig et al. [41] in diesem Sachstandsbericht). Daher müssen verstärkt sowohl internationale Abkommen als auch nationale Gesetze und ambitionierte Regelungen umgesetzt und eingehalten werden, wie zum Beispiel die Klimaschutzmaßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen des nationalen Klimaschutzgesetzes sowie der in Überarbeitung befindlichen neuen Regelungen zur Luftreinhaltung und zur Reduzierung der Luftschadstoffemissionen. Darüber hinaus gilt es über das in Planung befindliche Klimaanpassungsgesetz für Deutschland zeitnah notwendige Präventions- und Anpassungsmaßnahmen bundesweit vorzubereiten, um einen effektiven Schutz sowie die frühzeitige und vorsorgende Anpassung der Bevölkerung, auch aus gesundheitlicher Sicht, zu ermöglichen und zu gewährleisten.

Um durch Luftschadstoffe hervorgerufene gesundheitliche Belastungen zu vermeiden, sollte auf Ebene der individuellen Verhaltensprävention die Bevölkerung auf längere körperliche Anstrengungen zu den Tageszeiten verzichten, die mit erhöhten Luftschadstoffkonzentrationen einher gehen – dies gilt insbesondere für gesundheitlich vorbelastete Risikopersonen zum Beispiel im Laufe der Mittags- und Nachmittagsstunden während erhöhter Ozonkonzentrationen. Aus Sicht des vorbeugenden Gesundheitsschutzes sollte im Sinne des „Health in All Policies"-Ansatzes eine integrierte Umwelt-, Wirtschafts-, Verkehrs-, Klima- und Luftreinhaltepolitik verstärkt für die nachhaltige Einhaltung der Obergrenzen der Konzentrationswerte für Luftschadstoffe Sorge tragen – zumindest der politisch-gesetzlich festgeschriebenen Immissionswerte, am besten jedoch der wissenschaftlich abgeleiteten Richtwerte der neuen WHO-Luftqualitätsleitlinie 2021. Geeignete Maßnahmen sollten den unkontrollierten Anstieg des industriellen und individuellen Energieverbrauchs und den Anstieg der damit einhergehenden CO_2-Emissionen verhindern. Auch der Freisetzung von Ozonvorläufersubstanzen, die im Sommer vermehrt durch den Einsatz von Klimaanlagen emittiert werden, sollte vorgebeugt werden.

4.1 Synergien von Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschutz

Die Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas führt neben ihrer klimaschädlichen Wirkung auch zu gesundheitsbeeinträchtigenden Luftverschmutzungen. Deshalb gilt es einerseits zeitnah sowohl die Emissionen von Treibhausgasen systematisch zu reduzieren als auch umfangreiche Energieeinsparmaßnahmen umzusetzen und andererseits auch den Energiebedarf langfristig und dauerhaft aus erneuerbaren Energien zu decken, um die gesundheitlichen Risiken durch Luftverunreinigungen zu senken [42]. Energie-Großverbraucher des Gesundheitssektors, wie stationäre Gesundheitseinrichtungen, laufen im kontinuierlichen 24-Stunden-Betrieb und verursachen gemeinsam mit der ambulanten Leistungserbringung einen jährlichen Rohstoffkonsum von ca. 107 Millionen Tonnen

Entscheidungstragende sollten Synergien zwischen Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschutz nutzen.

(davon entfallen gut 50 % auf Biomasse und fossile Energieträger), wobei etwa ein Drittel aus heimischer Rohstoffentnahme stammen und zwei Drittel auf Importe zurückgehen [43]. Verhältnispräventive Maßnahmen zum Klimaschutz, wie die energetische Sanierung von Krankenhäusern und deren Ersatz durch an den Klimawandel angepasste Neubauten, wie Niedrigenergiegebäude, würden einen erheblichen Beitrag zum aktiven Klimaschutz leisten können und damit auch den Gesundheitsschutz für die Patientinnen, Patienten und Belegschaft in diesen Einrichtungen verbessern. Außer Frage steht, dass die Versorgung der Patientinnen und Patienten oberste Priorität hat und deshalb angesichts zunehmender extremer Hitzeereignisse Anpassungsmaßnahmen der baulich-klimatechnischen Sanierung, der Verschattung, der passiven Gebäudekühlung sowie, so medizinisch notwendig, der spezifischen Einzelraumklimatisierung auf Basis von erneuerbaren Energien zu berücksichtigen sind. Zentrale und koordinierte Maßnahmen des Klimaschutzes für eine deutschlandweite energetische Ertüchtigung bestehender Krankenhausgebäude fehlen jedoch bislang.

Eine integrierte Umwelt-, Klima- und Gesundheitspolitik sowie ein auf Klimaschutz ausgerichtetes Gesundheitsverhalten können synergistisch wirken und sogenannte Win-win-Situationen oder Health-Co-Benefits von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen erzeugen. Nachfolgende Beispiele für eine daraufhin ausgerichtete kombinierte Verhältnis- und Verhaltensprävention sind u. a.:

(1) Mobilität: Auf gesonderten und gesicherten Verkehrswegen vermeiden das Fahrradfahren und andere Formen des aktiven Transports durch körperliche Bewegung nicht nur Luftschadstoffemissionen des Kfz-Verkehrs, sondern reduzieren als Co-Benefit auch das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, fördern Fitness sowie Gesunderhaltung.

(2) Städtebau: Städtebauliche Maßnahmen wie der Rückbau versiegelter Flächen und der naturnahe Ausbau städtischer Grünflächen bewirken eine Verbesserung der Luftqualität und vermindern zusätzlich durch kühlere Luft und Schatten das Risiko hitzebedingter Gesundheitsschäden. Sie dienen nachweislich den ökologischen Bedarfen einer Stadt sowie der individuellen physischen und mentalen Gesunderhaltung [44].

4.2 Klimaresiliente und nachhaltige Gesundheitssysteme

Der deutsche Gesundheitssektor ist nach derzeitigen Schätzungen für gut 5–6,7 % der gesamtdeutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich [45, 46]. Diese entstehen zu etwa einem Drittel durch Emissionen aus Heizung und Energieverbrauch von Gesundheitseinrichtungen und zu etwa zwei Dritteln durch vor- und nachgelagerte Prozesse, wie Produktion von Medizinprodukten und Pharmazeutika, Lieferprozesse und Abfallentsorgung. Somit ist der Gesundheitssektor aufgefordert, bei gleichbleibender Versorgungsqualität in der Grundversorgung sowie unter Beibehaltung eines hohen Qualitätsstandards der erbrachten Leistungen seine Treibhausgasemissionen als Klimaschutz- und Luftreinhaltemaßnahme dauerhaft zu minimieren. Allerdings fehlt es in Deutschland bislang an einer nationalen Klimastrategie für das Gesundheitswesen. Eine repräsentative Erhebung zum Stand der Transformation zu einem klimaneutralen und klimaresilienten Gesundheitswesen befragte Führungskräfte sowie Fachärztinnen

und Fachärzte zu ihrer persönlichen Einstellung und der Umsetzung von Umwelt-, Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsmaßnahmen sowie zu Barrieren bei deren Implementation [47]. Die Umfrage zeigte, dass die Relevanz und die Dringlichkeit der Thematik vielen Entscheidungstragenden im Gesundheitssektor bewusst sind. Danach ist sich die große Mehrheit der befragten Ärzteschaft und Führungskräfte einig, dass Maßnahmen zur Bewältigung des Klimawandels in Gesundheitseinrichtungen ergriffen werden müssen. Jedoch fehle es an fachspezifischem Wissen für Klimaschutz und Nachhaltigkeit sowie klarer Verantwortlichkeit auf Führungsebene. Ein wichtiger Faktor für die Umsetzung der Transformation des Gesundheitswesens betrifft die Vermeidung nicht notwendiger Therapien, die sich entlastend auf personelle und schonend auf ökologische Ressourcen auswirken wird. Ferner identifizierte die Studie große Unkenntnis im Hinblick auf konkrete Klimaanpassungsstrategien, zum Beispiel bezüglich der Prävention gegenüber sommerlicher Hitze in Krankenhäusern, als Teil der internen Alarmplanung und Steigerung der Resilienz gegenüber Extremwetterereignissen. Als Teil der kritischen Infrastruktur steht das Gesundheitswesen erst am Beginn enormer Herausforderungen, um dessen Anpassungsbedarfe zu eruieren und die Möglichkeiten seiner Widerstandsfähigkeit langfristig zu stärken [45].

Durch das vermehrte Auftreten Klimawandel-assoziierter physischer und psychischer Erkrankungen, zum Beispiel ausgelöst durch Extremwetterereignisse, kommen neue Herausforderungen auch auf die in den Gesundheitsberufen Tätigen zu. Die Bedeutung des Klimawandels als ein die Gesundheit beeinflussender Faktor ist bislang in der Aus-, Fort- und Weiterbildung der Gesundheitsberufe nicht oder nur ansatzweise abgebildet. Eine Anpassung und Ergänzung der Weiterbildungsordnungen um entsprechende Inhalte sind zu empfehlen, die es den jetzt, wie auch künftig im Gesundheitswesen Tätigen ermöglichen, angemessen auf die klimabedingten Veränderungen zu reagieren [45].

5. Diskussion und Fazit

Insgesamt betrachtet hat sich die lufthygienische Situation in Deutschland in den letzten Jahrzehnten deutlich verbessert, jedoch gelingt es vielen Städten und Regionen bislang nicht, die europaweit gültigen Grenzwerte der Luftschadstoffbelastungen einzuhalten. Aktuelle Studien gehen trotz der Bemühungen zur Luftreinhaltung davon aus, dass die gesundheitlichen Risiken durch Luftverschmutzung künftig weiter zunehmen werden, vor allem in Ballungsräumen und Innenstädten [25]. Grund dafür ist ein nach wie vor hoher bzw. steigender Energieverbrauch durch Prozesse der fossilen Verbrennung. Darüber hinaus kann die Klimaerwärmung die Emissionen von Luftschadstoffen und ihren Vorläuferstoffen zusätzlich indirekt verändern. Neben der Steigerung des Ozonbildungspotenzials kann zunehmende Trockenheit die Feinstaubbelastung erhöhen, z. B. wenn sie Waldbrände befördert oder durch die Deflation ausgetrockneter Böden. Neben diesen Luftschadstoffen könnte die Veränderung der Dauer und Intensität der Pollenbelastung für eine zusätzliche gesundheitliche Belastung von Personen mit allergiebedingten Atemwegs- oder Lungenerkrankungen sorgen [48, 49]. In Bezug auf gesundheitliche Auswirkungen von Luftschadstoffen sind ferner die Interaktionen mit der Lufttemperatur, unter dem fortschrei-

Der Gesundheitssektor ist gefordert, seine Treibhausgasemissionen als Klimaschutz- und Luftreinhaltemaßnahme dauerhaft zu reduzieren.

tenden Klimawandel spezifisch mit Hitzeereignissen, zu beachten.

Reduzierte Grenzwerte zur Luftreinhaltung in der EU sind ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung der Luftqualität in Europa. Ein Absenken der Werte insbesondere für Feinstaub und NO_2 wäre ein wichtiger Beitrag zur Reduktion der Krankheitslast der Bevölkerung aufgrund von Luftschadstoffen. Wesentlich wäre zudem die Ausweitung der Luftschadstoffüberwachung, sowohl von regulierten als auch von nicht regulierten Luftschadstoffen, wie UFP, Rußpartikeln und Ammoniak. Eine Verpflichtung zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Luftqualität bis zu den Richtwerten der neuen Luftqualitätsleitlinien der WHO (2021) oder darunter könnte den gesundheitlichen Nutzen für die europäische Bevölkerung maximieren. Luftverschmutzung ist nach wie vor eine der häufigsten Ursachen für Krankheit und Tod, und die durch Luftverschmutzung verursachte Krankheitslast in Europa ist hoch. Dies stellt unter anderem auch eine enorme finanzielle Belastung dar und belastet die Gesundheitssysteme in der gesamten EU. Jede einzelne Person würde von sauberer Luft profitieren; Babys, Kinder, Schwangere, ältere Menschen und Menschen mit Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen gehören dabei zu den am stärksten gefährdeten Bevölkerungsgruppen. Daher brauchen wir eine ambitionierte Luftqualitätsregelung, die Maßnahmen auf allen Ebenen – EU, national, lokal – und in allen Sektoren wie Verkehr, Energie, Industrie, Landwirtschaft und Heizung von Wohngebäuden fördert und unterstützt. Die durch die Veröffentlichung der neuen WHO-Leitlinie initiierten, derzeit diskutierten Vorschläge zur Senkung der EU-Grenz- und -Zielwerte und weiteren Verbesserung der derzeitigen Luftqualität enthalten wichtige Schritte zur Erreichung sauberer Luft, aber es bedarf noch größeren Ehrgeizes, um den gesundheitlichen Nutzen für alle zu maximieren. Darüber hinaus wird bessere Luftqualität dazu beitragen, die Einflüsse des Klimawandels und die damit verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen abzumildern. Es ist also umso wichtiger, dass die derzeit diskutierten EU-Werte flächendeckend schon vor 2030 erreicht werden.

Reduzierte Grenzwerte zur Luftreinhaltung sind ein essenzieller Schritt zur Verbesserung der Luftqualität in Europa.

Das Zusammenwirken von hohen Lufttemperaturen mit Hitzeereignissen und Luftschadstoffen sowie ihre kombinierten gesundheitlichen Effekte sind jedoch noch nicht ausreichend erforscht, insbesondere unter Berücksichtigung des Klimawandels. Daher ist, neben der Entwicklung geeigneter Anpassungsmaßnahmen, weitere Grundlagenforschung zu den kombinierten Effekten von Luftschadstoffen und Temperatur auf die Gesundheit erforderlich, um ein verbessertes Verständnis der Zusammenhänge zu erlangen. Auch die Wirkung weiterer Multi-Expositionen, wie Luftschadstoff- und thermische Belastung in Kombination mit Pollen- und UV-Belastung ist bisher kaum erforscht. Da die atmosphärischen Umweltexpositionen nicht isoliert auf den Menschen einwirken, sondern der Mensch einem Mix an Umweltfaktoren ausgesetzt ist, ist eine umfassendere Betrachtung unerlässlich.

Im Bereich der Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen sollten ebenfalls Luftschadstoffe, Temperaturexposition sowie Pollen und UV gemeinsam gedacht werden, um effektive Handlungsmaßnahmen zu gestalten und umzusetzen. Dies gilt sowohl für verhaltenspräventive Maßnahmen als auch im Bereich der Verhältnisprävention. So sollte zum Beispiel in Hitzeaktionsplänen nicht nur primär die thermische Belastung adressiert werden, sondern auch

Schutzmaßnahmen vor anthropogenen und biogenen Luftschadstoffbelastungen. Auch bei der Gestaltung städtischer Grünflächen sind, neben dem Ziel der Minderung der thermischen Belastung, Luftschadstoffaspekte sowie weitere Faktoren zur mentalen und physischen Gesunderhaltung der städtischen Bevölkerung wie zum Beispiel Zugänglichkeit und Aufenthaltsqualität zu berücksichtigen. Im Bereich des Gesundheitswesens sollte eine nationale Klimawandelstrategie entwickelt werden, die sowohl die arbeitsmedizinischen Interessen des gesamten Personals und die Belange der Patientinnen und Patienten besonders berücksichtigt als auch die Veränderungen der Luftschadstoffexpositionen in der Bevölkerung beinhaltet. Dies kann nur im Rahmen einer inter- und transdisziplinären Zusammenarbeit gelingen. Programme, die die Luftverschmutzung reduzieren, führen zu großen Gesundheitsvorteilen, die sich über die Zeit verstärken. Die voraussichtlichen Kostenersparnisse der Gesundheitsvorteile durch verbesserte Luftqualität wiegen dabei die Implementierungskosten von Luftqualitätsmaßnahmen bei Weitem auf [50].

Korrespondenzadresse
Prof. Dr. Elke Hertig
Universität Augsburg, Medizinische Fakultät
Regionaler Klimawandel und Gesundheit
Universitätsstr. 2
86159 Augsburg
E-Mail: elke.hertig@med.uni-augsburg.de

Zitierweise
Breitner-Busch S, Mücke HG, Schneider A, Hertig E (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch erhöhte Luftschadstoffbelastungen der Außenluft. J Health Monit 8(S4): 111–131. DOI 10.25646/11649.2

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter: www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis
Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021–06/2024). Elke Hertig wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter der Projektnummer 408057478.

Interessenkonflikt
Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Danksagung
Die Autorinnen und der Autor danken Susanne Göttlicher für die Unterstützung bei der Erstellung von Abbildung 1 und Marcel Langner für die Erstellung der Vorlage für Abbildung 2.

Das RKI-Koordinationsteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur
1. Health Effects Institute (2020) State of Global Air 2020. Special Report. Health Effects Institute, Boston, MA. www.stateofglobalair.org (Stand: 31.03.2023)

2. GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020) Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. Lancet 396(10258):1223–1249

3. Baldermann C, Laschewski G, Grooß JU (2023) Auswirkungen des Klimawandels auf nicht-übertragbare Erkrankungen durch UV-Strahlung. J Health Monit 8(S4):61–81. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

4. Kessinger S, Minkos A, Dauert U et al. (2022) Luftqualität 2021 – vorläufige Auswertung. Umweltbundesamt (Hrsg) Hintergrundpapier. www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2021 (Stand: 31.03.2023)

5. Li J, Woodward A, Hou XY et al. (2017) Modification of the effects of air pollutants on mortality by temperature: A systematic review and meta-analysis. Sci Total Environ 575:1556–1570

6. Chen K, Wolf K, Breitner S et al. (2018) Two-way effect modifications of air pollution and air temperature on total natural and cardiovascular mortality in eight European urban areas. Environ Int 116:186–196

7. Vandentorren S, Empereur-Bissonnet P (2005) Health impact of the 2003 heat-wave in France. In: Kirch W, Bertollini R, Menne B (Hrsg) Extreme weather events and public health responses. Springer, Berlin, S. 81–87

8. Analitis A, Michelozzi P, D'Ippoliti D et al. (2014) Effects of heat waves on mortality: Effect modification and confounding by air pollutants. Epidemiology 25(1):15–22

9. Kislitsin V, Novikov S, Skvortsova N (2005) Moscow smog of summer 2002. Evaluation of adverse health effects. In: Kirch W, Bertollini R, Menne B (Hrsg) Extreme weather events and public health responses. Springer, Berlin, S. 255–262

10. Minkos A, Dauert U, Feigenspan S et al. (2019) Luftqualität 2018. Umweltbundesamt (Hrsg) Broschüren. www.umweltbundesamt.de/publikationen/luftqualitaet-2018 (Stand: 31.03.2023)

11. World Health Organization (2013) Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: Technical report. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen. https://apps.who.int/iris/handle/10665/341712 (Stand: 31.03.2023)

12. Thurston GD, Kipen H, Annesi-Maesano I et al. (2017) A joint ERS/ATS policy statement: What constitutes an adverse health effect of air pollution? An analytical framework. Eur Respir J 49(1):1600419

13. Newby DE, Mannucci PM, Tell GS et al. (2015) Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. Eur Heart J 36(2):83–93b

14. Schulz H, Karrasch S, Bölke G et al. (2019) Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit – Teil I. Pneumologie 73(05):288–305

15. European Environment Agency (2022) Health impacts of air pollution. www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution (Stand: 15.12.2022)

16. Rajagopalan S, Al-Kindi SG, Brook RD (2018) Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review. J Am Coll Cardiol 72(17):2054–2070

17. Dominici F, Schwartz J, Di Q et al. (2019) Assessing adverse health effects of long-term exposure to low levels of ambient air pollution: Phase 1. Res Rep Health Eff Inst 2019(200):1–51

18. Hoffmann B, Brunekreef B, Andersen ZJ et al. (2022) Benefits of future clean air policies in Europe: Proposed analyses of the mortality impacts of $PM_{2.5}$ and NO_2. Environ Epidemiol 6(5):e221

19. Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA 3rd et al. (2010) Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. Circulation 121(21):2331–2378

20. Rückerl R, Schneider A, Breitner S et al. (2011) Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. Inhal Toxicol 23(10):555–592

21. Peters A, Nawrot TS, Baccarelli AA (2021) Hallmarks of environmental insults. Cell 184(6):1455–1468

22. Schraufnagel DE, Balmes JR, Cowl CT et al. (2019) Air pollution and noncommunicable diseases: A review by the forum of international respiratory societies' environmental committee, part 2: Air pollution and organ systems. Chest 155(2):417–426

23. Schulz H, Karrasch S, Bölke G et al. (2019) Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit – Teil III. Pneumologie 73(07):407–429

24. Augustin J, Endlicher W, Herrmann A et al. (2023) Gesundheit. In: Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum Berlin Heidelberg, Berlin (im Druck)

25. von Schneidemesser E, Monks PS, Allan JD et al. (2015) Chemistry and the linkages between air quality and climate change. Chem Rev 115(10):3856–3897

26. Noyes PD, McElwee MK, Miller HD et al. (2009) The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. Environ Int 35(6):971–986

27. Hertig E, Russo A, Trigo RM (2020) Heat and ozone pollution waves in Central and South Europe – Characteristics, weather types, and association with mortality. Atmosphere 11(12):1271

28. Anenberg SC, Haines S, Wang E et al. (2020) Synergistic health effects of air pollution, temperature, and pollen exposure: A systematic review of epidemiological evidence. Environ Health 19(1):130

29. Breitner S, Pickford R, Schneider A (2021) Interaktion von Temperatur und Luftschadstoffen: Einfluss auf Morbidität und Mortalität. In: Günster C, Klauber J, Robra BP et al. (Hrsg) Versorgungs-Report Klima und Gesundheit. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Berlin, S. 105–117

30. Lou J, Wu Y, Liu P et al. (2019) Health effects of climate change through temperature and air pollution. Curr Pollut Rep 5(3):144–158

31. Hu X, Han W, Wang Y et al. (2022) Does air pollution modify temperature-related mortality? A systematic review and meta-analysis. Environ Res 210:112898

32. Winklmayr C, Matthies-Wiesler F, Muthers S et al. (2023) Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. J Health Monit 8(S4):3–34. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

33. Krug A, Fenner D, Mücke HG et al. (2020) The contribution of air temperature and ozone to mortality rates during hot weather episodes in eight German cities during the years 2000 and 2017. Nat Hazards Earth Syst Sci 20(11):3083–3097

34. Rahman MM, McConnell R, Schlaerth H et al. (2022) The effects of coexposure to extremes of heat and particulate air pollution on mortality in California: Implications for climate change. Am J Respir Crit Care Med 206(9):1117–1127

35. Katsouyanni K, Touloumi G, Samoli E et al. (2001) Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project. Epidemiology 12(5):521–531

36. Sillmann J, Aunan K, Emberson L et al. (2021) Combined impacts of climate and air pollution on human health and agricultural productivity. Environ Res Lett 16(9):093004

37. Areal AT, Zhao Q, Wigmann C et al. (2022) The effect of air pollution when modified by temperature on respiratory health outcomes: A systematic review and meta-analysis. Sci Total Environ 811:152336

38. Kioumourtzoglou MA, Schwartz J, James P et al. (2016) $PM_{2.5}$ and mortality in 207 US cities: Modification by temperature and city characteristics. Epidemiology 27(2):221–227

39. World Health Organization (2021) WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization, Geneva. https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329 (Stand: 31.03.2023)

40. Wichmann-Fiebig M, Langner M, Dauert U et al. (2022) Considerations on the revision of the Air Quality Directive 2008/50 EU. Scientific Opinion Paper. German Environment Agency, Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/considerations-on-the-revision-of-the-air-quality (As at 10.06.2023)

41. Hertig E, Hunger I, Kaspar-Ott I et al. (2023) Klimawandel und Public Health in Deutschland – Eine Einführung in den Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023. J Health Monit 8(S3):7–35. https://edoc.rki.de/handle/176904/11074 (Stand: 09.06.2023)

42. Romanello M, Di Napoli C, Drummond P et al. (2022) The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Health at the mercy of fossil fuels. Lancet 400(10363):1619–1654

43. Ostertag K, Bratan T, Gandenberger C et al. (2021) Ressourcenschonung im Gesundheitssektor – Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit. Umweltbundesamt (Hrsg) Texte 15/2021. www.umweltbundesamt.de/publikationen/ressourcenschonung-im-gesundheitssektor (Stand: 31.03.2023)

44. Böhme C, Franke T, Preuß T et al. (2021) Kooperative Planungsprozesse zur Stärkung gesundheitlicher Belange – Modellhafte Erprobung und Entwicklung von Ansätzen zur nachhaltigen Umsetzung. Teilbericht zur Dokumentenrecherche/-analyse (Arbeitspaket 1). Umweltbundesamt (Hrsg) Umwelt und Gesundheit 06/2021. www.umweltbundesamt.de/publikationen/kooperative-planungsprozesse-zur-staerkung (Stand: 31.03.2023)

45. Pichler PP, Jaccard IS, Weisz U et al. (2019) International comparison of health care carbon footprints. Environ Res Lett 14(6):064004

46. Karliner J, Slotterback S, Boyd R et al. (2019) Health Care's Climate Footprint. How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Health Care Without Harm, Arup. https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf (Stand: 31.03.2023)

47. Baltruks D, Mezger NCS, Schulz CM et al. (2022) Umsetzungsbereitschaft unter Ärzt:innen und Führungskräften für Klimaschutz und Nachhaltigkeit im Gesundheitswesen braucht Unterstützung. Centre for Planetary Health Policy, Berlin. https://cphp-berlin.de/umsetzung-von-klimaschutz-und-nachhaltigkeit-unter-aerztinnen-und-fuehrungskraeften-im-gesundheitswesen-braucht-unterstuetzung/ (Stand: 31.03.2023)

48. Wolf M, Ölmez C, Schönthaler K et al. (2021) Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021, Teilbericht 5: Klimarisiken in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. Umweltbundesamt (Hrsg) Climate Change 24/2021. www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-5-Wirtschaft-Gesundheit (Stand: 31.03.2023)

49. Bergmann KC, Brehler R, Endler C et al. (2023). Auswirkungen des Klimawandels auf allergische Erkrankungen in Deutschland. J Health Monit 8(S4):82–110. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)

50. Hoffmann B, Boogaard H, de Nazelle A et al. (2021) WHO air quality guidelines 2021 – Aiming for healthier air for all: A joint statement by medical, public health, scientific societies and patient representative organisations. Int J Public Health 66:1604465

Impressum

Journal of Health Monitoring
www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber
Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur
Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen
Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter, Dr. Kirsten Kelleher,
Dr. Livia Ryl, Simone Stimm

Satz
WEBERSUPIRAN.berlin, Alexander Krönke

Bildnachweis
Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis
Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Robert Koch-Instituts wider.

Corrigendum

Auf Seite 118 wurde der Prozess zur Bildung bodennahen Ozons falsch beschrieben. Die Vorläuferstoffe sind Stickoxide und Kohlenwasserstoffe. Der korrekte Satz lautet: „Wie oben erwähnt, begünstigt eine hohe Lufttemperatur zusammen mit intensiver Sonneneinstrahlung die Bildung bodennahen Ozons durch die Reaktion von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen."
Der Beitrag wurde entsprechend geändert.

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S4)
DOI 10.25646/11650
Robert Koch-Institut, Berlin

Scoping Review zu Klimawandel und psychischer Gesundheit in Deutschland – Direkte und indirekte Auswirkungen, vulnerable Gruppen, Resilienzfaktoren

Nadja Gebhardt[1], Katharina van Bronswijk[2], Maxie Bunz[3], Tobias Müller[4,5,6], Pia Niessen[7], Christoph Nikendei[1]

[1] Zentrum für Psychosoziale Medizin am Universitätsklinikum Heidelberg Klinik für Allgemeine Innere Medizin und Psychosomatik
[2] Psychologists/Psychotherapists for Future e. V., Bingen
[3] Medizinische Fakultät und Universitätsklinikum Köln Institut für Allgemeinmedizin
[4] Universität Cambridge, Vereinigtes Königreich Department of Politics and International Studies
[5] The New Institute, Hamburg Future of Democracy Working Group
[6] Yale University, New Haven, USA Department of Political Science
[7] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Eingereicht: 31.12.2022
Akzeptiert: 27.03.2023
Veröffentlicht: 06.09.2023

Abstract

Hintergrund: Der Klimawandel ist eine zentrale Bedrohung für die menschliche Gesundheit und wirkt sich direkt und indirekt auf die menschliche Psyche aus.

Methode: Um den Kenntnisstand zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland zu erfassen, wurde ein Scoping Review für die Schwerpunktthemen Extremwetterereignisse, Temperaturerhöhung, innerpsychische Verarbeitung, soziologische Aspekte und Resilienzfaktoren durchgeführt. Zehn Studien entsprachen den Einschlusskriterien der Suchanfragen in den Datenbanken Academic Search Complete, CINAHL, PubPsych, PubMed und PsychInfo. Die Mehrzahl der Studien betrachtete korrelative Zusammenhänge im Querschnittsdesign.

Ergebnisse: Es zeigen sich Hinweise auf eine Häufung an psychischen Störungen nach Extremwetterereignissen, zudem steigt bei höheren Temperaturen das Suizidrisiko und es zeigt sich ein vermehrt aggressives Verhalten. Die Mehrzahl von in Deutschland befragten Personen berichtet über Sorgen bezüglich der Folgen des Klimawandels, wenngleich diese aktuell jedoch nur selten zu einer klinisch bedeutsamen psychischen Belastung führen.

Schlussfolgerungen: Insgesamt ist die Evidenz für Deutschland als unzureichend einzustufen. Neben der absoluten Priorität des Klimaschutzes (Mitigation) durch Reduzierung der Emissionen bedarf es insbesondere zusätzlicher Forschung mit einem Fokus auf vulnerable Gruppen und Möglichkeiten der Prävention und Anpassung (Adaptation).

Dieser Artikel ist Teil der Beitragsreihe zum Sachstandsbericht Klimawandel und Gesundheit 2023.

KLIMAWANDEL · PSYCHISCHE GESUNDHEIT · MENTALE GESUNDHEIT · RESILIENZ · VERHÄLTNISPRÄVENTION

1. Einleitung

Die voranschreitenden klimatischen Veränderungen stellen eine der zentralen Bedrohungen für die Existenz der Menschheit dar und wirken sich auf mehreren Ebenen auf die menschliche Psyche aus. Zum einen beeinflussen Extremwetterereignisse sowie der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur in direkter Weise das psychische Befinden; zum anderen nimmt die Bewusstheit für bereits spürbare und zukünftige einschneidende Konsequenzen der klimatischen Veränderungen Einfluss auf unsere psychische Stabilität, unser emotionales Erleben und das hieraus

Extremwetterereignisse, steigende Temperaturen und die Bewusstheit für die Konsequenzen des Klimawandels scheinen sich negativ auf die psychische Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland auszuwirken.

resultierende Verhalten. Der Identifikation vulnerabler Gruppen sowie von Resilienzfaktoren auf individueller und gesellschaftlicher Ebene kommt im Hinblick auf den Erhalt der psychischen Gesundheit aller Bevölkerungsgruppen eine besondere Bedeutung zu. International sind die klimawandelbedingte Nahrungsmittelunsicherheit und Migration schon heute weitere bedeutsame psychische Stressoren [1]. Da diese Faktoren innerhalb von Deutschland (noch) keine spürbaren Auswirkungen haben, werden sie in diesem Artikel mit einem methodischen Fokus auf Deutschland nicht näher betrachtet.

1.1 Extremwetterereignisse und psychische Folgen

Im Zuge des Klimawandels werden Extremwetterereignisse häufiger. In Deutschland wird insbesondere mit vermehrten Starkregenereignissen, Hitzewellen und Stürmen zu rechnen sein [2, 3]. Eine detaillierte Analyse und Einbettung der psychischen Auswirkungen von Extremwetterereignissen in einen somatisch-gesamtgesundheitlichen und gesellschaftlichen Kontext findet sich im entsprechenden Artikel dieses Sachstandberichtes von Butsch et al. [4]. Bisherige internationale Studien konnten im Nachgang schwerwiegender Extremwetterereignisse (z. B. Starkregen mit Überschwemmungsfolge) einen Anstieg an posttraumatischen Symptomen, depressiven Entwicklungen, Angstsymptomen sowie an Substanzmittelmissbrauch feststellen [5, 6]. Ob und inwieweit solche Extremwetterereignisse zur Entstehung und Verschlimmerung psychischer Störungen beitragen, hängt laut internationalen Studien von verschiedenen Faktoren ab. Hierzu zählen die Art, Dauer und Schwere des Ereignisses, die resultierende körperliche (Un-)Versehrtheit, die unmittelbare Bedrohung des eigenen Lebens oder des Lebens einer nahestehenden Person, der Einfluss des Ereignisses auf die sozialen Netzwerke sowie die erfahrene Hilfe. Ob die eigene soziale Existenz durch die Zerstörung des eigenen Zuhauses, der persönlichen Infrastruktur oder den Verlust der Einkommensquelle beeinträchtigt wurde, ist ebenso von Relevanz wie die subjektive Bedeutsamkeit des Ereignisses und die Korrespondenz mit anderen biografischen Erlebnissen [6, 7]. Insbesondere Personen weiblichen Geschlechts und Personen mit bereits vorbestehender psychischer Störung gelten als vulnerabel für ein (erneutes) Auftreten und die Entwicklung weiterer psychischer Störungen infolge eines Extremwetterereignisses [8].

1.2 Direkte Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Psyche

Hitzebedingte Auswirkungen auf die körperliche Gesundheit werden von Winklmayr et al. [9] in diesem Sachstandsbericht dargestellt. Doch die klimawandelbedingte Zunahme von Tagen mit extremer Hitze und von Hitzewellen hat auch auf die psychische Gesundheit einen direkten Einfluss. In internationalen, groß angelegten epidemiologischen Studien konnte ein Zusammenhang von milderen Temperaturen, die näher an einer Komforttemperatur von 21 °C liegen, mit dem häufigeren Auftreten von sozial verträglicheren Charaktereigenschaften, welche durch Persönlichkeitszüge mit mehr Offenheit und Extraversion gekennzeichnet sind, belegt werden [10]. Heiße Tage und Hitzewellen wiederum führen zu einem aggressiveren und feindseligeren Verhalten [6, 11], welches sich auch in einer

Hitze und starke Temperaturanstiege führen zu erhöhten Suizidraten und vermehrtem aggressiven Verhalten.

Zunahme der Delinquenz, zum Beispiel in Form von Körperverletzungsdelikten, Morddelikten, Vergewaltigungen und Raubüberfällen niederschlägt [12]. Für die Allgemeinbevölkerung werden national und international Zusammenhänge von punktuellen Temperaturanstiegen mit einem Anstieg des Suizidrisikos am nachfolgenden Tag berichtet [13, 14]. Zudem scheint das Vorliegen einer psychischen Störung die Vulnerabilität für belastende Auswirkungen von Hitzephänomenen zu erhöhen: Bei Patientinnen und Patienten mit demenzieller Erkrankung, bipolarer Störung oder Schizophrenie lässt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Erhöhung der mittleren Tagestemperatur und dem Anstieg der Mortalität beobachten [15].

1.3 Wahrnehmung und innerpsychische Verarbeitung des Klimawandels

Die Bewusstwerdung und Realisierung der Auswirkungen des Klimawandels kann eine Vielzahl negativer Affekte [16] bis hin zu klinisch bedeutsamen psychischen Belastungen hervorrufen. Die emotionalen Reaktionen auf Klimainformationen werden unter Begrifflichkeiten wie Climate/Eco Anxiety, Climate/Eco Anger, Solastalgie, Ecological Grief, Ecological Guilt, Eco/Climate Depression oder Climate Distress in der Forschung diskutiert [17]. Eine einheitliche Operationalisierung der Begriffe fehlt jedoch bisher, was eine Vergleichbarkeit von Studienergebnissen erschwert [17]. Am häufigsten untersucht wurde bislang das durch die Climate Anxiety Scale operationalisierte Konstrukt der Climate Anxiety [18], es existieren jedoch unter anderem auch Fragebögen zur Eco Anxiety [19], Climate Worry [20], Solastalgie [21], Eco Grief und Eco Guilt [22]. Zusammenhänge von emotionalen Reaktionen auf den Klimawandel mit Risikowahrnehmung [23], Klimaschutzverhalten [24, 25], Verdrängung/Verleugnung des Klimawandels [26, 27] sowie zu Protestverhalten [25, 28] und psychischer Belastung [6, 29] standen bisher im Zentrum wissenschaftlicher Evaluationen. Internationale Studien stimmen darin überein, dass eine klimabezogene Besorgnis weit verbreitet ist, eine klinisch bedeutsame Symptomlast jedoch deutlich seltener auftritt [11, 30, 31].

1.4 Soziologische Aspekte der psychischen Folgen des Klimawandels

Bei der Erfassung der psychologischen Auswirkungen einer gesamtgesellschaftlichen Herausforderung wie dem Klimawandel spielen soziologische Einflussfaktoren eine zentrale, jedoch häufig wenig beachtete Rolle. Unter soziologischen Einflussfaktoren verstehen wir die vielfältigen sozialen Handlungskontexte, welche individuelles und kollektives Erleben, Reflektieren und Entscheiden beeinflussen. Während viele soziologische Faktoren mit demografischen Kategorien wie Gender, Alter, sozioökonomischem Status und Ethnizität korrelieren, zählen auch Organisationsformen, soziale Praktiken, geografische Spezifika, physische und ideelle Infrastrukturen, kulturelle Normen und politische Entscheidungsstrukturen als solche [32]. Dies ist besonders wichtig für einen nicht nur individuellen, sondern auch kollektiven Umgang mit psychologischen Beeinträchtigungen, welche durch den Klimawandel hervorgerufen oder verstärkt werden. Gruppenbezogene Determinanten von psychischer Gesundheit und Krankheit sind bei klimabezogener Epidemiologie, Risikoerfassung und Resilienz von großer

Bedeutung. Bevölkerungsgruppen, die durch bestehende strukturelle Benachteiligungen und Vulnerabilitäten ein höheres Risiko haben, negative Gesundheitseffekte zu erfahren, sind auch durch den Klimawandel und dessen psychische Auswirkungen verhältnismäßig stärker betroffen [33]. Internationale Studien zeigen, dass beispielsweise ältere Bevölkerungsgruppen stärker von psychischen Störungen infolge von Extremwetterereignissen betroffen sind [34]. Kinder wiederum zeigen eine deutlich erhöhte Vulnerabilität für die psychischen Folgen von Extremwetterereignissen wie Überschwemmungen und Wirbelstürmen [33]. Hierbei sind Mädchen eine besonders vulnerable Gruppe, für die bei durchlebten Naturkatastrophen ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von Angststörungen und Substanzmissbrauch besteht [33].

1.5 Resilienzfaktoren für die psychische Stabilität im Kontext Klimawandel

Neben den Risikofaktoren und Vulnerabilitäten, die einen Einfluss auf die Entstehung von psychischen Störungen haben, gibt es bislang kaum Forschung zu den schützenden Faktoren, die sich spezifisch auf klimawandelbedingte psychische Belastungen beziehen. Nach der Differenzierung von Clayton [29] lassen sich protektive Faktoren einerseits bei direkten, d. h. akuten Ereignissen wie Extremwetterereignissen, und andererseits bei indirekten Auswirkungen des Klimawandels finden. Bezüglich der direkten Auswirkungen des Klimawandels ähneln die Resilienzfaktoren zum großen Teil den Ergebnissen der Forschung zur posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) und identifizieren Persönlichkeitsfaktoren wie ein höheres Selbstwertgefühl und Kohärenzerleben (Empfinden, dass die Welt und man selbst verstehbar und vorhersagbar sind), individuelle Bewältigungsstrategien wie bedeutungsfokussiertes Coping und erfolgreiche Emotionsregulationsstrategien sowie Umgebungsfaktoren wie familiäre Unterstützung und Unterstützung im weiteren sozialen Umfeld [35]. Die Resilienzfaktoren bei indirekten Ereignissen sind national und international dagegen kaum erforscht, bislang liegen lediglich erste Erkenntnisse vor, dass Personenmerkmale wie das Geschlecht oder die politische Orientierung im Sinne einer Resilienz dazu führen können, dass eine psychische Belastung schneller zurückgehen kann [27].

1.6 Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland

Während international zu den beschriebenen Themen bereits mehrere Übersichtsarbeiten publiziert wurden, existieren lediglich wenige Forschungsarbeiten, die sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland beschäftigen. Um einen Überblick über die vorhandene Evidenz und den zusätzlichen Erkenntnisbedarf zu gewinnen, wurde jeweils ein Scoping Review für die oben ausgeführten Aspekte der Auswirkungen des Klimawandels für Deutschland durchgeführt. Um die von den Autorinnen und Autoren erwartete geringe Anzahl an Publikationen sinnvoll kontextualisieren zu können, wurden für die Diskussion der identifizierten Ergebnisse internationale Übersichtsarbeiten und Erkenntnisse miteinbezogen. Ziel war die Erarbeitung eines umfassenden Überblicks über den Stand der Forschung, um Handlungsempfehlungen zur Abschwächung der negativen Folgen

des Klimawandels auf die psychische Gesundheit der Bevölkerung Deutschlands abzuleiten.

2. Methode

Das Vorgehen bei der Erstellung des Scoping Reviews folgte den Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) [36]. Reviews internationaler Literatur zu den einzelnen Aspekten wurden ebenfalls anhand systematischer Suchanfragen erfasst. Relevante Publikationen ohne Peer Review wurden auf Basis des Vorwissens der Autorinnen und Autoren gezielt ausgewählt.

2.1 Scoping Review

Zwischen dem 05.09.2022 und dem 30.09.2022 wurden die Datenbanken Academic Search Complete, CINAHL, PubPsych, PubMed und PsychInfo nach wissenschaftlichen Arbeiten durchsucht, die in Überschrift oder Abstract eine der möglichen Kombinationen der Suchanfragen enthielten. Es wurde keine Beschränkung des Veröffentlichungsdatums vorgenommen. Alle Suchanfragen setzten sich aus je einem klimawandel- oder wetterbezogenen Begriff wie „climate change“ oder „heat wave“, der Spezifikation „German“ oder „Germany“ sowie einem für das Schwerpunktthema spezifischen Suchbegriff zusammen. Letzterer war beispielsweise für Extremwetterereignisse „post-traumatic stress disorder“, für Temperaturerhöhungen „aggression“, für innerpsychische Prozesse „climate anxiety“, für Resilienzfaktoren „resilience“ und für soziologische Aspekte „social infrastructure“. Es wurden nur in Peer-Review-Journals veröffentlichte Studien eingeschlossen. Die exakten Suchanfragen für die Datenbanken pro Schwerpunktthema werden in Annex Tabelle 1 dargestellt. Es wurde kein Review-Protokoll veröffentlicht.

Die Datenbankabfragen wurden für alle Themen von der Erstautorin (N.G.) durchgeführt. Die Titel und Zusammenfassungen der gefundenen Studien wurden von den Autorinnen und Autoren pro Schwerpunktthema überprüft (Extremwetterereignisse: M.B.; Temperaturerhöhung: C.N. und N.G.; innerpsychische Verarbeitung: K.B.; Resilienzfaktoren: P.N.; soziologische Aspekte: T.M.). Unklarheiten wurden im Forschungsteam diskutiert bis ein Konsens erreicht wurde. Artikel wurden ausgeschlossen, wenn sie sich nicht auf den Klimawandel bezogen; keinen Bezug zum Schwerpunktthema aufwiesen; ein qualitatives Forschungsdesign verwendet wurde; es sich um Reviews, Kommentare oder sonstige Artikel ohne eigens erhobene Daten handelte. Die ausgewählten Studien wurden von den Autorinnen und Autoren in eine standardisierte Tabelle übertragen. Hierfür wurde vor Beginn der Datenextraktion im gesamten Forschungsteam eine Tabelle mit den relevanten Variablen erstellt. Erfasst wurden: Datenquelle; (Teil-)Population; Anzahl der Untersuchungseinheiten; Region in Deutschland; betrachteter Zeitraum; Studienart; untersuchte Phänomene/Variablen; Instrumente; Ergebnisse. Wenn in Studien Daten aus mehreren Ländern berichtet wurden, wurden lediglich die auf Deutschland bezogenen Daten in die Tabelle aufgenommen.

Das Erleben von Extremwetterereignissen erhöht das Risiko für das Auftreten psychischer Folgeerkrankungen (posttraumatischen Belastungsstörungen, Angststörungen und Depressionen).

2.2 Review internationaler Literatur

International publizierte Reviews zu den Schwerpunktthemen des vorliegenden Beitrags wurden ebenfalls zwischen dem 05.09.2022 und dem 30.09.2022 ohne eine Spezifikation auf Deutschland und anhand derselben Suchstrategie zusammengestellt wie das Scoping Review. Diese wurden in die Diskussion miteinbezogen, um die für Deutschland in den Ergebnissen berichteten Studien sinnvoll kontextualisieren zu können. Hierfür wurde die Suchanfrage mit dem Zusatz „systematic review OR meta-analysis OR meta analysis OR literature review OR scoping review“ versehen. Auch diese Suchanfragen sind in Annex Tabelle 1 einzusehen.

3. Ergebnisse

Insgesamt erzielten die Suchanfragen für Deutschland über alle Schwerpunktthemen hinweg 486 Treffer, davon 111 Duplikate, sodass 375 Studien auf ihre Relevanz überprüft wurden. Hiervon wurden 365 ausgeschlossen, sodass zehn Studien in die finale Auswertung eingeschlossen wurden. Verschiedene Studienergebnisse eines Artikels [37] wurden sowohl für das Schwerpunktthema innerpsychische Verarbeitung als auch Resilienzfaktoren in die Ergebnisse mit eingeschlossen, sodass sich die Ergebnisdarstellung auf zehn Studien aus neun Artikeln bezieht. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien; die den PRISMA-Richtlinien entsprechenden Flussdiagramme [38] der Artikelauswahl pro Thema sind in Annex Abbildung 1 einzusehen.

3.1 Extremwetterereignisse und psychische Folgen in Deutschland

Die initiale Suche ergab 99 Treffer, hiervon 20 Duplikate und einen Artikel, der nicht in Deutsch oder Englisch verfasst wurde, sodass für 78 Studien Titel und Abstract gescreent wurden. Hiervon wurden 73 ausgeschlossen, da es sich nicht um Veröffentlichungen mit Bezug zu Extremwetterereignissen handelte, drei weitere wurden aufgrund ihres fehlenden Bezuges zu psychischen Auswirkungen der Extremwetterereignisse ausgeschlossen sowie eine Übersichtsarbeit ohne Daten aus Deutschland. Final wurde eine Studie eingeschlossen und begutachtet.

Otto et al. [39] untersuchten anhand querschnittlicher Fragebogendaten die Auswirkungen der Flutkatastrophe in Sachsen im Jahr 2002 bei n=112 Betroffenen. Hiervon screenten 23 % positiv für das Vorliegen einer PTBS, 13 % für das einer Depression und 11 % für das einer Angststörung. Prädiktiv für eine höhere Belastung durch posttraumatische Symptome war das Gefühl sich in Lebensgefahr zu wähnen, private Verluste erlitten zu haben sowie das Erleben, dass die eigene Zukunft zerstört wurde. Die empfundene Lebensgefahr sowie die Annahme einer zerstörten Zukunft waren ebenfalls prädiktiv für eine stärkere Ausprägung von Angst- und Depressionssymptomen. Die Autorinnen und Autoren wiesen außerdem auf einen möglichen protektiven Effekt des persönlichen Glaubens an eine gerechte Welt auf die Ausprägung von Angst- und Depressionssymptomen hin.

Tabelle 1
Ergebnisse des Scoping Reviews zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland

Schwerpunktthema: Extremwetterereignisse und psychische Folgen in Deutschland								
Autorin/Autor, Publikationsjahr	**Datenquelle**	**(Teil-) Population**	**Anzahl (n)**	**Region, Zeitraum**	**Studienart**	**Untersuchte Phänomene/Variablen**	**Instrumente**	**Ergebnisse**
Otto et al. [39], 2006	Fragebogen-erhebung	Betroffene der Flut-katastrophe 2002 in Sachsen	112	Sachsen, 2002–2003	Querschnitts-design	PTBS, Depression, Angststörungen, allgemeiner psycho-logischer Distress	Validierte, psychologische Fragebögen (IES-R, BDI, BAI, BSI)	PTBS-Symptomatik: n=26, Symptome einer Depression: n=15, ausgeprägte Angst: n=12. Jene, die angaben in Lebensgefahr gewesen zu sein, private Verluste erlitten hatten und annahmen, dass ihre Zukunft beeinträchtigt wird, hatten eine signifikant ausgeprägtere Symptomatik einer PTBS. Bei Lebensgefahr und Erwartung einer beeinträchtigten Zukunft stieg außerdem die Wahr-scheinlichkeit für Depression und Angst.

PTBS = posttraumatische Belastungsstörung, IES-R = Impact of Event Scale Revised, BDI = Beck Depression Inventory, BAI = Beck Anxiety Inventory, BSI = Brief Symptom Inventory

Schwerpunktthema: Direkte Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Psyche in Deutschland								
Autorin/Autor, Publikationsjahr	**Datenquelle**	**(Teil-) Population**	**Anzahl (n)**	**Region, Zeitraum**	**Studienart**	**Untersuchte Phänomene/Variablen**	**Instrumente**	**Ergebnisse**
Eisele et al. [40], 2021	Elektronische Gesundheits-daten	Patientinnen und Patienten in psychia-trischen Einrichtungen	164.435	Baden-Württemberg, 2007–2019	Korrelative Zusammen-hänge im Querschnitts-design	Aggressives Verhalten	SOAS-R	Bei Tageshöchsttemperaturen >30 °C signifikant mehr aggressive Zwischenfälle, Anzahl steigt linear mit der Temperatur; kein signifikanter Zusammen-hang der Tageshöchsttemperatur mit der Anzahl an Zwangsmaßnahmen
Müller et al. [41], 2011	Behördliche Daten	(Versuchte) Suizide in der Allgemein-bevölkerung	2.987	Mittelfranken, Bayern, 1998–2005	Korrelative Zusammen-hänge im Querschnitts-design	Versuchter Suizid, vollendeter Suizid	Polizeiliche Protokolle	Signifikanter Anstieg der Anzahl an Suizidversuchen und Suiziden bei steigenden Temperaturen und ver-mehrter Sonneneinstrahlung; kein signifikanter Zu-sammenhang mit Luftfeuchtigkeit, Geschlecht, Mo-tiv oder Methode des Suizid(versuch)s
Schneider et al. [42], 2020	Behördliche Daten	Suizide in der Allgemein-bevölkerung	10.595	Bayern, 1990–2006	Korrelative Zusammen-hänge im Querschnitts-design	Suizid	Nicht anwendbar	Signifikanter Anstieg der Anzahl an Suiziden um 5,7 % bei Temperaturanstiegen >5 °C am Vortag in Sommer, Herbst und Winter, nicht im Frühling; 9,0 % für Personen >65 Jahre

SOAS-R = Staff Observation Aggression Scale Revised

Fortsetzung nächste Seite

Schwerpunktthema: Wahrnehmung und innerpsychische Verarbeitung des Klimawandels in Deutschland								
Autorin/Autor, Publikationsjahr	**Datenquelle**	**(Teil-) Population**	**Anzahl (n)**	**Region, Zeitraum**	**Studienart**	**Untersuchte Phänomene/Variablen**	**Instrumente**	**Ergebnisse**
Klöckner et al. [37], 2010[1]	Fragebogen-erhebung	9- bis 14-jährige Schülerinnen und Schüler (repräsentativ), Jahrgänge 4–7 an Regelschulen (keine Förderschulen)	2.013	Hessen, 2010	Korrelative Zusammenhänge im Querschnittsdesign, multithematische Panelstudie	Emotionale Reaktionen, Umweltverhalten, allgemeines Wohlbefinden	Selbst erstellter Fragebogen mit je 1 Item zu Gefühlen, Wohlbefinden, Handlungswissen, Handlungsmöglichkeiten	Die meisten Kinder berichten ethisch motivierte, selbstbezogene Emotionen, z. B. ein schlechtes Gewissen wegen des Klimawandels. Mädchen nannten häufiger als Jungen konsequenz-basierte Emotionen (Angst, Trauer), aber seltener coping-zentrierte nicht-emotionale Äußerungen (z. B. Desinteresse). Mit Bezug auf den Klimawandel wuchs mit dem Alter der Kinder der Anteil coping-zentrierter Äußerungen sowie anderer nicht-emotionaler Äußerungen. Ethisch motivierte, selbstbezogene Emotionen wurden mit zunehmendem Alter seltener. Das Wohlbefinden ist durch klimawandelbezogene Emotionen kaum beeinträchtigt.
Lippold et al. [43], 2020	Online-Umfrage	Allgemeinbevölkerung	3.469	Deutschland, 03/2020	Multivariate lineare Regressionsmodelle	Angst vor Coronavirus, Geflüchteten und Klimawandel	rRST-Q, BFI und sonst selbsterstellte Items	Im internationalen Vergleich berichten Befragte in Deutschland weniger Angst vor dem Klimawandel als Befragte aus anderen Staaten. Angst vor dem Klimawandel korreliert negativ mit einer konservativen politischen Einstellung.
Schwaab et al. [44], 2022	Fragebogen-erhebung	Medizinstudierende	203	Heidelberg, 05–12/2021	Korrelative Zusammenhänge im Querschnittsdesign	Psychische Belastung allgemein und durch Klimawandel, Resilienzfaktoren	Klimawandelfragen aus dem European Social Survey, PHQ-9, GAD-7, PTSS-10, PSQ-20, RQ, OPD-SF, SOC-13	60 % der Teilnehmenden berichten, (sehr) besorgt über den Klimawandel zu sein, klinische Symptome (Trauma, Depression, Angst) bei Gedanken an den Klimawandel werden jedoch kaum berichtet, 23 % berichten allerdings erhöhte Stresslevel (PSQ-20). Diese korrelieren mit einem weniger sicheren Bindungsstil, weniger struktureller Integration und einem weniger ausgeprägten Kohärenzgefühl.
Wullenkord et al. [45], 2021	Online Fragebogen-erhebung	Allgemeinbevölkerung (stratified sampling)	1.011	Deutschland, keine Angabe	Korrelative Zusammenhänge im Querschnittsdesign	Psychische Belastung allgemein und durch den Klimawandel, Umweltverhalten, politische Orientierung	Climate Anxiety Scale (deutsche Übersetzung), PHQ-4, Skalen zu politischer Einstellung und Einstellung zur Umwelt	Hohe Werte an Climate Anxiety gehen einher mit hohen Angst- und Depressionswerten, einer Vermeidung des Themas im Alltag und mehr Bewusstsein für die Auswirkungen des Klimawandels und den eigenen Anteil an seiner Genese. Frauen berichten mehr Climate Anxiety als Männer, kein Unterschied für Bildung und Einkommen. Umweltfreundliches Verhalten ist ausgeprägter bei hohen Werten an Climate Anxiety.

[1] Pro Schwerpunktthema werden jeweils die interessierenden Teilergebnisse der Studie von Klöckner et al. [37] berichtet.
rRST-Q = revised Reinforcement Sensitivity Theory Questionnaire, BFI = Big Five Inventory, PHQ = Patient Health Questionnaire, GAD = Generalised Anxiety Disorder Scale, PTSS = Posttraumatic Stress Scale, PSQ = Perceived Stress Questionnaire, RQ = Relationship Questionnaire , OPD-SF = Operationalised Psychodynamic Diagnostics Short Form, SOC = Sense of Coherence

Tabelle 1 *Fortsetzung nächste Seite*

Schwerpunktthema: Resilienzfaktoren für die psychische Stabilität im Kontext Klimawandel in Deutschland								
Autorin/Autor, Publikationsjahr	**Datenquelle**	**(Teil-) Population**	**Anzahl (n)**	**Region, Zeitraum**	**Studienart**	**Untersuchte Phänomene/Variablen**	**Instrumente**	**Ergebnisse**
Klöckner et al. [37], 2010[1]	Fragebogen-erhebung	9- bis 14-jährige Schülerinnen und Schüler (repräsentativ), Jahrgänge 4–7 an Regelschulen (keine Förderschulen)	2.013	Hessen, 2007	Korrelative Zusammenhänge im Querschnittsdesign	Berichterstattung Klimawandel, Emotionale Betroffenheit, Verhaltensänderungen	Selbst erstellter Fragebogen	Die Art der klimawandelbezogenen Emotionen hängt nicht mit dem allgemeinen Wohlbefinden zusammen. Allerdings berichten Kinder, die Emotionen wie Traurigkeit über den Klimawandel haben und zugleich Ideen haben, wie dieser abzuschwächen wäre (z. B. Bahn statt Auto fahren), ein geringeres Wohlbefinden. Kinder, die emotionale Reaktionen auf den Klimawandel berichten, haben mehr Handlungswissen zum Klimaschutz als Kinder, die sich emotional von der Klimadiskussion zurückziehen.
Wullenkord und Reese [27], 2021	Online Fragebogen-erhebung	Allgemeinbevölkerung (convenience sample)	Studie 1: n = 354 Studie 2: n = 453	Deutschland, keine Angabe	Korrelative Zusammenhänge im Querschnittsdesign	Selbstschutzstrategien, PEB, soziodemografischer Hintergrund (Alter, Geschlecht, Bildung, Einkommen), politische Orientierung	Climate Self-Protection Scale	Es existieren verschiedene Selbstschutzstrategien bei der Bewältigung der durch den Klimawandel ausgelösten Emotionen und Ängste. Ein männliches Geschlecht und eine rechtsgerichtete politische Orientierung stehen in Zusammenhang mit Bewältigungsstrategien wie Vermeidung, Rationalisierung oder der Negierung der globalen und persönlichen Konsequenzen des Klimawandels sowie der eigenen Mitschuld bei der Verursachung.

[1] Pro Schwerpunktthema werden jeweils die interessierenden Teilergebnisse der Studie von Klöckner et al. [37] berichtet.
PEB = Pro-environmental Behaviour

Tabelle 1 *Fortsetzung*
Ergebnisse des Scoping Reviews zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland

3.2 Direkte Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Psyche in Deutschland

Die initiale Suche ergab 73 Treffer, hiervon 15 Duplikate und einen Treffer in einer anderen Sprache als Deutsch oder Englisch, sodass für 57 Studien Titel und Abstract gescreent wurden. Hiervon wurden 48 ausgeschlossen, da es sich nicht um Veröffentlichungen mit Bezug zur Umgebungstemperatur und deren Auswirkung auf die Psyche handelte. Zudem wurden sieben weitere Studien ausgeschlossen, da kein Bezug zur psychischen Gesundheit bestand. Zusätzlich entsprach eine Studie aus der Datenbankabfrage für das Thema „soziologische Aspekte“ den Einschlusskriterien und wurde ebenfalls in die finale Synthese miteingeschlossen, sodass drei Studien eingeschlossen wurden. Bei allen eingeschlossenen Studien wurden querschnittlich Zusammenhänge zwischen psychischen Variablen und Temperaturen am selben Tag oder in den vorangehenden Tagen betrachtet. Müller et al. [46] berichteten von einem Anstieg der Suizidrate um 0,9 % pro 1 °C Temperaturanstieg im Frühling und Sommer, nicht aber im Herbst und Winter. Schneider et al. [42] errechneten einen Anstieg des

Suizidrisikos um 5,7 % bei Temperatursprüngen um 5 °C am Vortag in Sommer, Herbst und Winter, jedoch nicht im Frühling, wobei das Risiko für ältere Menschen besonders hoch war. Eine Studie konnte anhand von elektronischen Gesundheitsdaten für Patientinnen und Patienten in psychiatrischen Einrichtungen einen signifikanten Zusammenhang von Tageshöchsttemperaturen von über 30 °C und aggressiven Zwischenfällen zeigen [40].

3.3 Wahrnehmung und innerpsychische Verarbeitung des Klimawandels in Deutschland

Die innerpsychische Verarbeitung des Klimawandels führt zu vielen Sorgen, jedoch selten zu krankheitswertigen psychischen Belastungen.

Die initiale Suche ergab 79 Treffer, hiervon acht Duplikate und einen Treffer in einer anderen Sprache als Deutsch oder Englisch, sodass für 70 Studien Titel und Abstract gescreent wurden. Ein Artikel war nicht abrufbar, 52 wurden ausgeschlossen, da es sich nicht um Veröffentlichungen mit Bezug zum Klimawandel handelte. Zudem wurden neun weitere Studien ausgeschlossen, da kein Bezug zur psychischen Gesundheit bestand, bei zwei Studien wurden keine Daten erhoben, bei zwei weiteren Studien wurde keine deutsche Stichprobe untersucht. Letztlich entsprachen vier Studien den Einschlusskriterien.

Bei allen eingeschlossenen Studien wurden querschnittlich Zusammenhänge zwischen psychischen Variablen und dem subjektiven Wohlbefinden untersucht. Bei Lippold et al. [43] wurde Angsterleben aufgrund des Klimawandels mit dem Angsterleben im Rahmen der COVID-19-Pandemie verglichen. In den anderen Studien lag der Fokus auf der Erhebung der emotionalen Auswirkung des Klimawandels. Die Ergebnisse stimmen basierend auf Fragebogendaten darin überein, dass aktuell kaum klinisch bedeutsame psychische Belastungen durch die emotionale Auseinandersetzung mit dem Klimawandel entstehen [37, 44, 45]. Kinder und Jugendliche gelten jedoch als vulnerable Gruppen für die Entwicklung einer klinisch manifesten psychischen Störung im Falle einer Zunahme der Klimawandelfolgen [37]. Lippold et al. [43] fanden eine im internationalen Vergleich unterdurchschnittliche Ausprägung von berichteter Angst aufgrund des Klimawandels. Wullenkord et al. [45] berichten von stärker ausgeprägten Ängsten in Bezug auf den Klimawandel bei Frauen; zudem berichteten Teilnehmende weniger stark ausgeprägte Klimaängste, wenn sie die globalen und persönlichen Konsequenzen des Klimawandels sowie die eigene Mitschuld bei der Verursachung als geringer einschätzten. Durch den Klimawandel bedingtes wahrgenommenes Stresserleben korreliert positiv mit einem weniger sicheren Bindungsstil, einer geringeren Verfügbarkeit regulierender Selbst-Funktionen und einem weniger ausgeprägten Kohärenzgefühl, also dem Empfinden, dass die Welt und man selbst verstehbar und vorhersagbar sind [44].

3.4 Soziologische Aspekte der psychischen Folgen des Klimawandels in Deutschland

Die initiale Suche ergab 140 Treffer, davon 44 Duplikate, sodass für 96 Studien Titel und Abstracts gescreent wurden. Hiervon wurden 91 ausgeschlossen, da es sich nicht um Veröffentlichungen zu soziologischen Aspekten mit Bezug zum Klimawandel handelte. Zusätzlich wurden zwei Studien ausgeschlossen, da kein Bezug zu psychischer Gesundheit bestand, eine weitere, da die Daten überwiegend außerhalb von Deutschland erhoben wurden, eine, da es

sich um qualitative Daten handelte und eine, da die Bezüge zur psychischen Gesundheit nicht durch Daten belegt wurden. Somit konnte keine Studie als quantitative Arbeit zu soziologischen Aspekten der psychischen Folgen des Klimawandels in Deutschland eingeschlossen werden.

3.5 Resilienzfaktoren für die psychische Stabilität im Kontext Klimawandel in Deutschland

Die initiale Suche ergab 95 Treffer, hiervon 24 Duplikate, sodass für 71 Studien Titel und Abstract gescreent wurden. Hiervon wurden 47 ausgeschlossen, da es sich nicht um Veröffentlichungen mit Bezug zum Klimawandel handelte, zwölf weitere wurden aufgrund des fehlenden Bezuges zu psychischen Auswirkungen und zehn weitere aufgrund des fehlenden Bezuges zur Resilienz bzw. Bewältigungsmechanismen ausgeschlossen. Es wurden zwei Studien eingeschlossen und begutachtet.

Bei den beiden eingeschlossenen Studien wurden querschnittlich Bewältigungsstrategien in Bezug auf klimawandelbedingte Psychopathologien identifiziert. Dabei wurden in einer Studie von Wullenkord und Reese [27] Selbstschutzstrategien und deren Zusammenhänge im Umgang mit den Auswirkungen des Klimawandels mit einem hierfür erstellten Messinstrument analysiert. Es konnte zunächst die Existenz verschiedener Bewältigungsstrategien wie Vermeidung, Rationalisierung, oder die Negierung der globalen und persönlichen Konsequenzen des Klimawandels sowie der eigenen Mitverantwortung bei der Verursachung gezeigt werden. Des Weiteren waren diese Strategien bei Männern und bei rechtsgerichteter politischer Orientierung ausgeprägter vorhanden, lediglich Vermeidung wurde ausgeprägter von Frauen als von Männern berichtet. Klöckner et al. [37] untersuchten 9- bis 14-jährige Schülerinnen und Schüler und konnten zeigen, dass emotionale Reaktionen auf den Klimawandel mit einem Mehr an Wissen dazu, wie man diesen abschwächen könnte, positiv korrelierten. Die Autorinnen und Autoren werteten dies als Hinweis darauf, dass Kinder, die mit dem Klimawandel überfordert sind, sich emotional zurückziehen und in der Folge auch Informationen zum Thema vermindert aufnehmen. Es bestand kein Zusammenhang zwischen der Art der klimawandelbezogenen Emotionen und dem allgemeinen Wohlbefinden.

Psychische Resilienzfaktoren können eine entscheidende Rolle bei der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels spielen.

4. Diskussion

4.1 Stärken und Limitationen

Der vorliegende Review gibt einen umfassenden Überblick über die Literatur zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland und greift hierbei auf eine breite Datenbasis aus insgesamt fünf systematischen Literaturrecherchen in fünf Datenbanken zurück. Dieser breit angelegten Suchstrategie steht jedoch eine höchst unzureichende Studienlage gegenüber, sodass die Generalisierbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt ist. Zur Ableitung aussagekräftiger Handlungsempfehlungen werden die gewonnenen Ergebnisse daher vor dem Hintergrund von Umfragen und Studien ohne Peer Review aus Deutschland und den per systematischer Literaturrecherche zusammengestellten international publizierten Reviews zu den Schwerpunktthemen des vorliegenden Beitrags betrachtet, wobei die Studienlage auch hier insbesondere bei Fragen der erfolgreichen Adaptation unzureichend ist [48]. Die verwendeten Suchbegriffe wurden jeweils pro Schwer-

Für alle untersuchten Themenfelder ist die Studienlage für Deutschland als unzureichend anzusehen und macht abschließende Schlussfolgerungen schwierig.

punktthema angepasst, um möglichst alle relevanten Publikationen einzuschließen; es ist aber nicht auszuschließen, dass bei anderen Kombinationen an Suchbegriffen womöglich noch zusätzliche Studien eingeschlossen worden wären. Die Ergebnisse qualitativer Arbeiten wurden aufgrund des verfolgten methodischen Ansatzes nicht in diesen Review miteingeschlossen. In Anbetracht der vielfältigen noch zu verstehenden Zusammenhänge von Klimawandel und psychischer Gesundheit bieten diese allerdings viele ergänzende Ergebnisse, wie etwa ein besseres Verständnis für die Zusammenhänge von klimawandelbezogenen Emotionen und generellem Wohlbefinden oder von Resilienz in Bezug auf psychische Belastungen durch den Klimawandel [49–52].

4.2 Evidenz und Erkenntnisbedarf

Im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland zeigt sich eine große Diskrepanz zwischen dem für Deutschland verfügbaren Daten- und Wissensstand und den vorhandenen Erkenntnissen im internationalen Bereich. Sowohl national als auch international besteht allerdings ein großer Bedarf an weiteren wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den psychischen Auswirkungen der Klimakrise und möglichen Adaptationsstrategien.

Gemeinsame Aspekte über die Schwerpunktthemen hinweg

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland sind sowohl quer- als auch längsschnittlich bislang nur unzureichend untersucht. Bisherige internationale Erkenntnisse zu den in diesem Beitrag für Deutschland untersuchten Schwerpunktthemen stammen zum Großteil aus Australien, Kanada und den USA. Nur ein geringer Anteil der Studien bezieht sich auf die europäische Bevölkerung [48]. Zudem sind insbesondere in Bezug auf innerpsychische Prozesse und Resilienzfaktoren relevante Konstrukte nicht klar definiert und validierte Messinstrumente größtenteils fehlend, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und die Ableitung von Handlungsempfehlungen erschwert. Auch für die Erfassung der psychischen Belastungsmuster werden unterschiedliche methodische Ansätze und Evaluationsinstrumente verwendet. Oftmals werden mittels Fragebögen Belastungssyndrome erfasst, diese jedoch nicht klinisch validiert bzw. keine klinischen Diagnosen von klinischen tätigen Expertinnen und Experten gestellt oder validierte, mit Manualen psychischer Störungen korrespondierende klinisch-strukturierte Interviews durchgeführt (z. B. das strukturierte klinische Interview nach DSM-V, dem Leitfaden zur Diagnostik psychischer Störungen [53]). Ein besonderer Fokus zukünftiger Forschung sollte auf der psychischen Belastung für vulnerable Gruppen liegen, zu der es für Deutschland kaum Erkenntnisse gibt. Eine erhöhte Vulnerabilität bei Kindern und Jugendlichen, älteren Menschen, Personen mit vorbestehenden psychischen Störungen oder niedrigem sozioökonomischen Status ist in Korrespondenz zu internationalen Studien anzunehmen [11, 48, 54]. Gleiches gilt für Personen, die den Konsequenzen des Klimawandels entweder in direkter Form, durch Extremwetterereignisse, oder indirekt, z. B. als Aktivistinnen und Aktivisten oder als Angehörige von Gesundheitsberufen, vermehrt ausgesetzt sind [33, 48].

Um die psychische Resilienz zu fördern und den aus dem Klimawandel resultierenden psychischen Belastungen adäquat zu begegnen, bedarf es dringend einer Erweiterung unseres Wissensstandes.

Extremwetterereignisse und psychische Folgen

Die in einer regionalen Stichprobe in Deutschland [39] festgestellte hohe Inzidenz an posttraumatischen Belastungssymptomen, Depression und Angst im Nachgang eines untersuchten Flutereignisses deckt sich mit Erkenntnissen aus der internationalen Literatur [5, 11, 55, 56]. Überschwemmungen können zudem bereits im Vorfeld bestehende psychische Störungen verstärken [57]. Dies schlägt sich auch in einer höheren Verschreibungsrate von Psychopharmaka wie Sedativa (Schmerzmittel), Hypnotika (Schlafmittel) oder Antidepressiva nach Überschwemmungen und Sturmfluten nieder [58, 59]. Jene Personen, die durch die Überschwemmung umgesiedelt werden müssen, haben ein deutlich höheres Risiko für eine spätere psychische Störung, die auch noch ein Jahr nach dem Ereignis zu beobachten ist [60]. Insbesondere Kinder und Jugendliche weisen eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber den Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf, da sie über weniger Bewältigungsstrategien verfügen und die stärker ausgeprägte Neuroplastizität (Veränderungen in Aufbau und Struktur des Gehirns als Reaktion auf äußere Einflüsse) sie anfälliger für stressbedingte neuroanatomische und endokrine Veränderungen macht [61, 62]. Als Risikofaktoren für psychische Folgen bei Kindern und Jugendlichen identifizierten Mambrey et al. [33] in der internationalen Literatur innerfamiliäre Konflikte, geringe soziale Unterstützung, Verlust des sozialen Umfeldes durch Umsiedelung sowie einen niedrigen sozioökonomischen Status der Eltern.

Direkte Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Psyche

Die für Deutschland berichtete erhöhte Prävalenz an Suiziden bei höheren Tagestemperaturen im Vergleich zum Vortag wurde auch in internationalen Reviews aufgezeigt, in denen ein Zusammenhang der Suizidraten mit einem Anstieg der Tagesdurchschnittstemperaturen im Vergleich zum Vortag und mit höheren Tagesdurchschnittstemperaturen im Allgemeinen gefunden wurde [13, 14]. Dass dieser Zusammenhang für Deutschland konsistent für den Sommer, nicht aber für die kälteren Jahreszeiten berichtet wird, könnte mit der (noch) nahe an oder unterhalb der Komforttemperatur von 21 °C liegenden Tagesdurchschnittstemperaturen in Herbst, Frühling und Winter liegen. Der Anstieg der Tagesdurchschnittstemperaturen wird mit fortschreitendem Klimawandel jedoch weiter zunehmen [63]. Offen bleibt die Frage, ob die Suizidrate durch Aufklärungsmaßnahmen und Hitzeschutz reduziert werden kann. Das von Eisele et al. [40] berichtete vermehrte aggressive Verhalten in psychiatrischen Einrichtungen wurde international auch für die Allgemeinbevölkerung gezeigt [6, 11]. Neben den Auswirkungen auf das Suizidrisiko wurde in internationalen Studien ein erhöhtes Risiko für Hospitalisierungen in psychiatrischen Einrichtungen bei höheren Tagesdurchschnittstemperaturen berichtet [48]. Eine in den USA durchgeführte Studie stellte bei Tagesdurchschnittstemperaturen, die 21 °C überstiegen, weniger positive und mehr negative Emotionen bei den Probandinnen und Probanden fest [11]. Personen mit vorbestehenden psychischen Störungen sowie Kinder und Jugendliche sind besonders vulnerabel für die Auswirkungen von Hitze auf die psychische Gesundheit [48].

Wahrnehmung und innerpsychische Verarbeitung des Klimawandels

Da die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Zukunft zunehmen werden, bedarf es eines besseren Verständnisses zum Übergang zwischen einer adäquaten emotionalen Reaktion auf den Klimawandel einerseits und einer resultierenden krankheitswertigen psychischen Belastung andererseits. In Deutschland durchgeführte Umfragen zeigen im Einklang mit internationalen Studienergebnissen eine hohe Prävalenz (40–73 %) von in den Umfragen nicht genauer operationalisierten Ängsten, Trauer und Wut bei allen Altersgruppen [64–67]. Diese Empfindungen stiegen nach den Überschwemmungen im Juli 2021 bundesweit deutlich an (um 20 Prozentpunkte [66]). Es kann vermutet werden, dass die mediale Berichterstattung über die Überschwemmungen einen Einfluss auf die innerpsychische Verarbeitung und die in der Folge von den Befragten berichteten negativen Affekte genommen hat. In diesem Sinne sollte auch die Rolle der Medien für die psychischen Adaptationsprozesse an den Klimawandel und die Mitigation kritisch reflektiert werden. Hierzu können Medienleitfäden als Anregung zu einer Berichterstattung dienen, die weder das Ziel haben, auftretende Wetterphänomene zu verharmlosen, noch ein Ohnmachtserleben zu verstärken [68]. In einem Bericht des Umweltbundesamtes zur emotionalen Befindlichkeit junger Menschen im Kontext des Klimawandels gaben jeweils 26 % der Befragten an, dass Sorgen um die Umwelt ihr Freuderleben einschränkten und ihnen Schlafprobleme bereiteten [69]. Internationale Studien zeigen, dass die Mehrheit junger Menschen unabhängig vom Geschlecht die Auswirkungen auf das Klima bedenken bei der Entscheidung, Kinder zu bekommen [47]. Für einen besseren Umgang mit Klimagefühlen sowie eine Stärkung der Resilienzfaktoren sind eine gute Psychoedukation sowie Möglichkeiten zum Austausch mit Gleichgesinnten und das Erleben kollektiver Selbstwirksamkeit durch Handlungsmöglichkeiten für die gesellschaftliche Transformation und den Klimaschutz notwendig [70].

Soziologische Aspekte der psychischen Folgen des Klimawandels

Die aktuelle Studienlage zu soziologischen Aspekten klimawandelbedingter Beeinträchtigungen der psychischen Gesundheit ermöglicht keine klaren Aussagen über Risikofaktoren, Auswirkungen und mögliche Gegenmaßnahmen. Zudem liegen im deutschsprachigen Raum derzeit keine Studien vor, die den Zusammenhang von Klimawandel und spezifischen soziodemografischen oder soziologischen Faktoren und intersektionalen Diskriminierungen (d. h. die sich verstärkenden Wirkungen interdependenter Systeme von Diskriminierung wie Patriarchat, Kapitalismus, Kolonialismus, Ableismus, also die Diskriminierung von Menschen mit eingeschränkten psychischen oder physischen Fähigkeiten [71–73]) speziell auf psychische Gesundheit hin untersuchen. In diesem Zusammenhang wären soziodemografische Faktoren wie ethnische Zugehörigkeit, Migrationshintergrund und sozioökonomischer Status interessant, sowie soziologische Faktoren wie räumliche Marginalisierung (etwa aufgrund der Stigmatisierung und infrastruktureller Mangelversorgung bestimmter Stadtteile, in welchen bestimmte ethnische, kulturelle oder religiöse Gruppierungen verstärkt vertreten sind). Studien zu den psychischen Auswirkungen eines Extremereignisses wie

der COVID-19-Pandemie haben gezeigt, dass soziologische Faktoren wie ein Wohnsitz in einem gesundheitsinfrastrukturell benachteiligten Stadtviertel, eine geringe Anzahl an Sozialkontakten und Teil einer strukturell rassistisch diskriminierten Minderheit zu sein, nicht nur zu einer höheren Mortalität, sondern auch zu einem erheblich höheren Risiko psychischer Belastungen führen können [74]. Durch den Klimawandel ist eine Zunahme gesellschaftlicher Ausnahmezustände durch Hitzewellen, Versorgungsengpässe, Überschwemmungen, Stromausfälle oder den Zusammenbruch öffentlicher und privater Leistungen zu erwarten. Daher ist eine Analyse der unterschiedlichen Lebenswelten, in welchen soziologische Faktoren positive wie negative Einflüsse haben können, für einen psychologisch sensiblen Umgang mit den durch den Klimawandel hervorgerufenen Krisensituationen unabdinglich.

Soziologische Aspekte sind bei Extremereignissen mitentscheidend für die adäquate gesundheitliche Versorgung.

Resilienzfaktoren für die psychische Stabilität im Kontext Klimawandel

Der Klimawandel verringert durch Stressfaktoren wie Hitze, schlechte Luftqualität sowie den möglichen Verlust emotional bedeutsamer Orte und Landschaften bis hin zur Zwangsmigration die Möglichkeiten des Aufbaus psychischer Resilienz, was die Stärkung vorhandener psychischer Ressourcen auf individueller und kollektiver Ebene umso wichtiger erscheinen lässt [11]. In den für Deutschland betrachteten Studien zeigten sich verschiedene Verständnisse von Resilienz: So werden zum einen Faktoren wie das biologische Geschlecht identifiziert, die das Risiko für die Entwicklung einer psychischen Belastung reduzieren und somit eine Resilienz herstellen. Zum anderen werden Faktoren untersucht, die aktiv schützend wirken, wie etwa die soziale Unterstützung. So kann bei einem erhöhten Risiko ein schützender Faktor zur Resilienz führen. Gleichzeitig sind diese schützenden Faktoren bei einem niedrigen Risiko für eine psychische Belastung nicht relevant für die psychische Gesundung nach einem belastenden Ereignis. Die Einordnung als Resilienzfaktor ist somit abhängig von der bestehenden Vulnerabilität eines Individuums. Die Ergebnisse der vorliegenden Studien sind nur bedingt aussagekräftig in diesem Zusammenhang. Die von Wullenkord und Reese [27] untersuchten Selbstschutzstrategien betrachten zwar eine Form der Bewältigung von klimawandelbedingten psychischen Belastungen; sie werden von ihnen jedoch nicht als Resilienzfaktoren im Sinne einer gelungenen Bewältigung verstanden, sondern als dysfunktionale Mechanismen (Leugnen und Verdrängung). Auch die von Klöckner et al. [37] identifizierten Faktoren werden eher als Reaktionsmechanismen und weniger als erfolgreiche Bewältigung beschrieben. Ergänzend hierzu werden in einem Bericht des Umweltbundesamtes aus qualitativen Interviews mit jungen Klima-Aktivistinnen und -Aktivisten Wissen zum Umgang mit psychischen Belastungen, positive kognitive Annahmen, Unterstützung und Wertschätzung sowie soziale und gesellschaftliche Unterstützungsstrukturen als Resilienzfaktoren identifiziert [69]. Die internationale Literatur zu Resilienzfaktoren bezieht sich hauptsächlich auf einzelne Extremwetterereignisse [35]. Die indirekten Faktoren, wie etwa die Auswirkungen des Klimawandels auf die Psyche in Regionen, die derzeit (noch) nicht akut von den Folgen des Klimawandels betroffen sind, sind demgegenüber bislang nicht untersucht. Chen et al. [75] konnten eine umfangreiche Liste von Resilienzfaktoren ausfindig machen. Hier zeigt sich, dass insbesondere intakte Familien-

strukturen und ein höheres Bildungsniveau nach Extremwetterereignissen aktiv schützend vor psychischen Belastungen wirken. Das gibt Hinweise darauf, dass es weniger die individuellen psychischen Bewältigungsmöglichkeiten sind, die einen erfolgreichen Umgang mit der einhergehenden psychischen Belastung ermöglichen, sondern vielmehr die gesellschaftliche und soziale Einbettung des Individuums. Eine Förderung von Resilienzfaktoren ist also auf einer kollektiven bzw. politischen Ebene notwendig.

Neben der Reduzierung unserer Emissionen bedarf es eines Ausbaus der gesellschaftlichen Aufklärung, der psychischen Versorgung vulnerabler Gruppen sowie von Betroffenen nach Extremwetterereignissen.

4.3 Handlungsempfehlungen

Die in Tabelle 2 aufgeführten Handlungsempfehlungen ergeben sich aus den gesammelten in diesem Artikel dargestellten Erkenntnissen. Da für Deutschland noch ein großer Forschungsbedarf besteht, ergeben sich die identifizierten Handlungsfelder aus dem Abgleich mit der internationalen Literatur. Die hieraus abgeleiteten Maßnahmen wurden nach Einschätzungen der Autorinnen und Autoren auf den deutschen Kontext angepasst. Hierbei wird angenommen, dass für den anglo-amerikanischen Sprachraum gültige Erkenntnisse größtenteils auf den europäischen Kontext übertragen werden können. Weiterführend kann also auf entsprechende Publikationen, beispielsweise der American Psychological Association [11], verwiesen werden. Das Positionspapier zu Klimawandel und psychischer Gesundheit der Deutschen Gesellschaft für Psychiatrie und Psychotherapie, Psychosomatik und Nervenheilkunde (DGPPN) [76] floss ebenfalls in die Erstellung der Handlungsempfehlungen als Informationsquelle mit ein und wurde in seinen Überlegungen auf den Public-Health-Kontext angepasst.

Die genannten Handlungsempfehlungen beziehen sich dezidiert auf Gesundheitsförderung durch medizinisch-psychotherapeutische Behandlung, Verhältnis- und Verhaltensprävention, und somit auf die Adaptation an die Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit. Ein Ausbau des psychiatrischen und psychotherapeutischen Versorgungsangebotes erscheint umso dringender, als dass die heutige Versorgungssituation bereits weit hinter dem Bedarf zurückbleibt [77]. Ein Einbezug des Klimawandels und seiner Auswirkungen auf die psychische Gesundheit in die Ausbildung von psychotherapeutisch arbeitenden Berufen zielt auch auf die Behandlerinnen und Behandler selbst: Diese müssen zunächst einen eigenen Weg der innerpsychischen Verarbeitung des Wissens um den Klimawandel und seine Auswirkungen finden, erst auf dieser Grundlage kann eine kompetente Behandlung von Patientinnen und Patienten mit klimawandelbezogenen Themen sichergestellt werden [78–80].

In Anbetracht der zahlreichen negativen Konsequenzen des Klimawandels für die menschliche Psyche ist nochmals in aller Deutlichkeit zu betonen, dass neben der Entwicklung von Adaptationsstrategien Maßnahmen des Klimaschutzes weiterhin zwingend erforderlich sind und oberste Priorität haben, um eine Zunahme psychischer Risiken zu minimieren. In diesem Sinne ist Klimaschutz der wirksamste Gesundheitsschutz [81]. Das Gesundheitswesen, welches in Deutschland je nach Schätzungen 5,2 % – 6,7 % der nationalen Treibhausgasemissionen verursacht [82, 83], ist der Gesundheit der Bevölkerung und somit auch dem Klimaschutz in besonderer Weise verpflichtet.

Tabelle 2
Handlungsempfehlungen für die Gesundheitsförderung durch medizinisch-psychotherapeutische Behandlung sowie durch Verhältnis- und Verhaltensprävention zur Adaptation an die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland

Gesundheitsförderung mittels Einbezuges der Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Adaptationsprozesse			
Notwendige Maßnahmen/Zielgruppe	**Ansatzpunkt/Zielsetzung**	**Akteurinnen/Akteure**	**Erfordernisse für Umsetzbarkeit**
Aktive Beteiligung von Expertinnen und Experten des Gesundheitswesens an politischen Transformationsprozessen	Einbezug psychischer Gesundheit bei der Identifikation von Bedarfen, Resilienz-Ressourcen und sozialer Adaptation an Klimafolgen im Kontext politischer Entscheidungs- und Transformationsprozesse	Bundes-, Landes- und kommunale Ebene	Finanzielle und personelle Ressourcen auf der Ebene der Intervention
Ausbildung von Verantwortlichen für Aspekte der psychischen Gesundheit, Partizipation dieser bei der Strategieentwicklung für Adaptation und Abschwächung der Konsequenzen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in öffentlichen Einrichtungen, insbesondere im Gesundheitswesen	Schutz der psychischen Gesundheit der Bevölkerung durch nachhaltige Abschwächung der Folgen des Klimawandels für die psychische Gesundheit und Adaptation	Landesebene, kommunale Ebene	Finanzielle und personelle Ressourcen, Schaffung entsprechender Stellen als Change Agents

Gesundheitsförderung mittels psychosozialer Notfallversorgung und psychotherapeutischer Behandlung			
Notwendige Maßnahmen/Zielgruppe	**Ansatzpunkt/Zielsetzung**	**Akteurinnen/Akteure**	**Erfordernisse für Umsetzbarkeit**
Schulung und Erweiterung der psychosozialen Notfallversorgung	Sekundärprävention psychischer Langzeitfolgen nach Extremwetterereignissen	Bundes- und Landesebene	Expertise-basierte Bedarfsschätzungen, finanzielle und personelle Ressourcen, Etablierung und Erweiterung vorhandener Strukturen
Anpassung der Bedarfsplanung der psychotherapeutischen Versorgung durch Beratungsstellen und Psychotherapeutinnen und Psychotherapeuten an die (steigenden) klimawandelbedingten Bedarfe inkl. Bedarfsspitzen nach Extremwetterereignissen	Verbesserung der gesamtgesellschaftlichen psychischen Gesundheit durch bedarfsgerechte Versorgung und Sekundärprävention	Bundes- und Landesebene (Politik und Selbstverwaltung)	Expertise-basierte Bedarfsschätzung, finanzielle und personelle Ressourcen

Gesundheitsförderung mittels Verhältnisprävention			
Notwendige Maßnahmen/Zielgruppe	**Ansatzpunkt/Zielsetzung**	**Akteurinnen/Akteure**	**Erfordernisse für Umsetzbarkeit**
Integration von Erkenntnissen über den Zusammenhang von planetarer und psychischer Gesundheit in die Aus-, Fort- und Weiterbildung von Gesundheitspersonal sowie Kriseninterventionsdiensten	Verbesserung der gesamtgesellschaftlichen psychischen Gesundheit durch Psychoedukation und Verhältnisprävention	Bundes- und Landesebene, Zuständige für die Erstellung von Studienordnungen, Aus-/Weiterbildungsordnungen	Schulung von Lehrenden, finanzielle und personelle Ressourcen

Fortsetzung nächste Seite

Notwendige Maßnahmen/Zielgruppe	Ansatzpunkt/Zielsetzung	Akteurinnen/Akteure	Erfordernisse für Umsetzbarkeit
Förderung weiterer Forschung und Entwicklung von Interventionen zu Klimakrise und psychischer Gesundheit	Verbesserung von Prävention und Behandlung klimawandelbedingter psychischer Belastungen und Störungen	Bundesebene, Universitäten	Finanzielle und personelle Ressourcen
Erstellung von Hitzeaktionsplänen, städtebauliche Veränderungen zu Schwammstädten mit mehr Grünflächen	Schutz vulnerabler Gruppen, Förderung des psychischen Wohlbefindens	Bundes-, Landes- und kommunale Ebene	Finanzielle und personelle Ressourcen auf kommunaler Ebene
Etablierung von Klimaräten, in welchen insbesondere auch Vertreterinnen und Vertreter von gesellschaftlich marginalisierten sowie besonders vulnerablen Gruppen exekutive und legislative Organe über lokale/regionale Maßnahmen beraten und mitentscheiden	Partizipation von gesellschaftlichen Gruppen zur Identifikation von Bedarfen, Resilienz-Ressourcen und sozialer Adaptation an Klimafolgen	Bundes-, Landes- und kommunale Ebene	Finanzielle und personelle Ressourcen auf der Ebene der Intervention, bei Mitentscheidungsbefugnissen legislative Änderungen nötig

Gesundheitsförderung mittels Verhaltensprävention			
Notwendige Maßnahmen/Zielgruppe	**Ansatzpunkt/Zielsetzung**	**Akteurinnen/Akteure**	**Erfordernisse für Umsetzbarkeit**
Öffentlichkeitsarbeit zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit, zu Präventions- und Behandlungsmöglichkeiten sowie Möglichkeiten zur Stärkung der individuellen und kollektiven Resilienz	Empowerment von (potenziell) Betroffenen und der allgemeinen Bevölkerung durch Information über individuelle Handlungsmöglichkeiten und über die ergriffenen Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung	Bundes-, Landes- und kommunale Ebene, Leistungserbringerinnen und -erbringer	Finanzielle und personelle Ressourcen, weitere Forschung mit Bezug zum deutschen Raum, auf die entsprechende Öffentlichkeitsarbeit inhaltlich Bezug nehmen kann

Tabelle 2 *Fortsetzung*
Handlungsempfehlungen für die Gesundheitsförderung durch medizinisch-psychotherapeutische Behandlung sowie durch Verhältnis- und Verhaltensprävention zur Adaptation an die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit in Deutschland

4.4 Fazit

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit sind vielfältig und in ihrer Ausprägung abhängig von individuellen und gesellschaftlichen Faktoren. Direkt nehmen Extremwetterereignisse und steigende Durchschnittstemperaturen Einfluss auf die psychische Gesundheit, indirekt die Bewusstheit für den Anteil des Menschen an der Entstehung des Klimawandels und seine Konsequenzen. Für Deutschland sind diese Prozesse bislang nur höchst unzureichend untersucht, und sowohl für Deutschland als auch in der internationalen Literatur fehlt es vor allem an Erkenntnissen dazu, wie eine erfolgreiche Adaptation an die Auswirkungen des Klimawandels auf die psychische Gesundheit gelingen kann. Hier sollte ein Schwerpunkt weiterführender Forschung gesetzt werden. Neben der Adaptation ist auch die Mitigation als gesamtgesellschaftliche Aufgabe zu sehen. Dem Gesundheitswesen kommt hier eine besondere Rolle zu, da dieses einen erheblichen Anteil an den menschlichen Treibhausgasemissionen hat und eine erfolgreiche Reduktion dieses Anteils zeitgleich die Gesundheit der Patientinnen und Patienten schützt.

Korrespondenzadresse
Nadja Gebhardt
Zentrum für Psychosoziale Medizin am Universitätsklinikum Heidelberg
Klinik für Allgemeine Innere Medizin und Psychosomatik
Thibautstr. 4
69115 Heidelberg
E-Mail: nadja.gebhardt@med.uni-heidelberg.de

Zitierweise

Gebhardt N, van Bronswijk K, Bunz M, Müller T, Niessen P et al. (2023) Scoping Review zu Klimawandel und psychischer Gesundheit in Deutschland – Direkte und indirekte Auswirkungen, vulnerable Gruppen, Resilienzfaktoren. J Health Monit 8(S4): 132–161. DOI 10.25646/11650

Die englische Version des Artikels ist verfügbar unter: www.rki.de/jhealthmonit-en

Förderungshinweis

Die Koordination der Publikation erfolgte im Rahmen des Projekts KlimGesundAkt, das durch das Bundesministerium für Gesundheit gefördert wird (Kapitel 1504; Titel 54401 HJ2021; Laufzeit 07/2021 – 06/2024). Katharina van Bronswijk erhielt für ihren Beitrag ein Honorar aus den Projektmitteln.

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Danksagung

Das RKI-Koordinationsteam des Projekts KlimGesundAkt dankt Sophie Gepp, Elke Hertig, Claudia Hornberg, Tanja-Maria Kessel, Andreas Matzarakis, Odile Mekel, Susanne Moebus, Jonas Schmidt-Chanasit, Alexandra Schneider, Klaus Stark, Wolfgang Straff und Maike Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. Walinski A, Sander J, Gerlinger G et al. (2023) The effects of climate change on mental health. Dtsch Arztebl Int 120(8):117–124
2. Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg) (2017) Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Mölter T, Schindler D, Albrecht A et al. (2016) Review on the projections of future storminess over the North Atlantic European region. Atmosphere 7(4):60
4. Butsch C, Beckers LM, Nilson E et al. (2023) Gesundheitliche Auswirkungen von Extremwetterereignissen – Risikokaskaden im anthropogenen Klimawandel. J Health Monit 8(S4):35–60. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)
5. Fernandez A, Black J, Jones M et al. (2015) Flooding and mental health: A systematic mapping review. PLoS One 10(4):e0119929
6. Cianconi P, Betrò S, Janiri L (2020) The impact of climate change on mental health: A systematic descriptive review. Front Psychiatry 11:74
7. Bunz M, Mücke HG (2017) Klimawandel – physische und psychische Folgen. Bundesgesundheitsbl 60(6):632–639
8. Chique C, Hynds P, Nyhan MM et al. (2021) Psychological impairment and extreme weather event (EWE) exposure, 1980–2020: A global pooled analysis integrating mental health and well-being metrics. Int J Hyg Environ Health 238:113840
9. Winklmayr C, Matthies-Wiesler F, Muthers S et al. (2023) Hitze in Deutschland: Gesundheitliche Risiken und Maßnahmen zur Prävention. J Health Monit 8(S4):3–34. www.rki.de/jhealthmonit (Stand: 06.09.2023)
10. Wei W, Lu JG, Galinsky AD et al. (2017) Regional ambient temperature is associated with human personality. Nat Hum Behav 1(12):890–895
11. Clayton S, Manning C, Speiser M et al. (2021) Mental health and our changing climate: Impacts, inequities, responses. American Psychological Association and ecoAmerica, Washington, D.C. www.apa.org/news/press/releases/mental-health-climate-change.pdf (Stand: 04.06.2023)
12. Mahendran R, Xu R, Li S et al. (2021) Interpersonal violence associated with hot weather. Lancet Planet Health 5(9):e571–e572

13. Gao J, Cheng Q, Duan J et al. (2019) Ambient temperature, sunlight duration, and suicide: A systematic review and meta-analysis. Sci Total Environ 646:1021–1029

14. Thompson R, Hornigold R, Page L et al. (2018) Associations between high ambient temperatures and heat waves with mental health outcomes: A systematic review. Public Health 161:171–191

15. Liu J, Varghese B, Hansen A et al. (2021) Effects of high temperatures on poor mental health outcomes: A systematic review and meta-analysis. Eur J Public Health 31:iii242–iii242

16. Pihkala P (2020) Anxiety and the ecological crisis: An analysis of eco-anxiety and climate anxiety. Sustainability 12(19):7836

17. Pihkala P (2022) Toward a taxonomy of climate emotions. Front Clim 3:738154

18. Clayton S, Karazsia BT (2020) Development and validation of a measure of climate change anxiety. J Environ Psychol 69:101434

19. Hogg TL, Stanley SK, O'Brien LV et al. (2021) The Hogg Eco-Anxiety Scale: Development and validation of a multidimensional scale. Glob Environ Change 71:102391

20. Stewart AE (2021) Psychometric properties of the Climate Change Worry Scale. Int J Environ Res Public Health 18(2):494

21. Higginbotham N, Connor L, Albrecht G et al. (2007) Validation of an environmental distress scale. EcoHealth 3(4):245–254

22. Ágoston C, Urbán R, Nagy B et al. (2022) The psychological consequences of the ecological crisis: Three new questionnaires to assess eco-anxiety, eco-guilt, and ecological grief. Clim Risk Manag 37:100441

23. Salas Reyes R, Nguyen VM, Schott S et al. (2021) A research agenda for affective dimensions in climate change risk perception and risk communication. Front Clim 3:751310

24. Adams I, Hurst K, Sintov ND (2020) Experienced guilt, but not pride, mediates the effect of feedback on pro-environmental behavior. J Environ Psychol 71:101476

25. Stanley SK, Hogg TL, Leviston Z et al. (2021) From anger to action: Differential impacts of eco-anxiety, eco-depression, and eco-anger on climate action and wellbeing. J Clim Chang Health 1:100003

26. Haltinner K, Ladino J, Sarathchandra D (2021) Feeling skeptical: Worry, dread, and support for environmental policy among climate change skeptics. Emot Space Soc 39:100790

27. Wullenkord MC, Reese G (2021) Avoidance, rationalization, and denial: Defensive self-protection in the face of climate change negatively predicts pro-environmental behavior. J Environ Psychol 77:101683

28. Nabi RL, Gustafson A, Jensen R (2018) Framing climate change: Exploring the role of emotion in generating advocacy behavior. Sci Commun 40(4):442–468

29. Clayton S (2021) Climate change and mental health. Curr Environ Health Rep 8(1):1–6

30. Coffey Y, Bhullar N, Durkin J et al. (2021) Understanding eco-anxiety: A systematic scoping review of current literature and identified knowledge gaps. J Clim Chang Health 3:100047

31. Whitmarsh L, Player L, Jiongco A et al. (2022) Climate anxiety: What predicts it and how is it related to climate action? J Environ Psychol 83:101866

32. American Psychologial Association (2023) APA Dictionary of Psychology – Sociological factors. https://dictionary.apa.org/sociological-factors (Stand: 06.03.2023)

33. Mambrey V, Wermuth I, Böse-O'Reilly S (2019) Extreme weather events and their impact on the mental health of children and adolescents. Bundesgesundheitsbl 62(5):599–604

34. Leyva EWA, Beaman A, Davidson PM (2017) Health impact of climate change in older people: An integrative review and implications for nursing. J Nurs Scholarsh 49(6):670–678

35. Ma T, Moore J, Cleary A (2022) Climate change impacts on the mental health and wellbeing of young people: A scoping review of risk and protective factors. Soc Sci Med 301:114888

36. Tricco AC, Lillie E, Zarin W et al. (2018) PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. Ann Intern Med 169(7):467–473

37. Klöckner CA, Beisenkamp A, Hallmann S (2010) Klimawandel aus der Sicht 9- bis 14-jähriger Kinder – Emotionen, Bewältigungsressourcen und allgemeines Wohlbefinden. Umweltpsychologie 14(2):121–142

38. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 372:n71

39. Otto K, Boos A, Dalbert C et al. (2006) Posttraumatic symptoms, depression, and anxiety of flood victims: The impact of the belief in a just world. Pers Individ Dif 40(5):1075–1084

40. Eisele F, Flammer E, Steinert T et al. (2021) Aggressive incidents in psychiatric hospitals on heat days. BJPsych Open 7(4):e99

41. Müller H, Biermann T, Renk S et al. (2011) Higher environmental temperature and global radiation are correlated with increasing suicidality – A localized data analysis. Chronobiol Int 28(10):949–957

42. Schneider A, Hampel R, Ladwig KH et al. (2020) Impact of meteorological parameters on suicide mortality rates: A case-crossover analysis in Southern Germany (1990–2006). Sci Total Environ 707:136053

43. Lippold JV, Laske JI, Hogeterp SA et al. (2020) The role of personality, political attitudes and socio-demographic characteristics in explaining individual differences in fear of coronavirus: A comparison over time and across countries. Front Psychol 11: 552305

44. Schwaab L, Gebhardt N, Friederich HC et al. (2022) Climate change related depression, anxiety and stress symptoms perceived by medical students. Int J Environ Res Public Health 19(15):9142

45. Wullenkord MC, Tröger J, Hamann KRS et al. (2021) Anxiety and climate change: A validation of the Climate Anxiety Scale in a German-speaking quota sample and an investigation of psychological correlates. Clim Change 168:20

46. Müller H, Biermann T, Renk S et al. (2011) Higher environmental temperature and global radiation are correlated with increasing suicidality – A localized data analysis. Chronobiol Int 28(10):949–957

47. Schneider-Mayerson M, Leong KL (2020) Eco-reproductive concerns in the age of climate change. Clim Change 163(2):1007–1023

48. Charlson F, Ali S, Benmarhnia T et al. (2021) Climate change and mental health: A scoping review. Int J Environ Res Public Health 18(9):4486

49. Peter F, Niessen P (2022) Resilienz als Konzept für die Klimakrise. In: Van Bronswijk K, Hausmann CM (Hrsg) Climate Emotions. Psychosozial-Verlag, S. 229–256

50. Benoit L, Thomas I, Martin A (2022) Review: Ecological awareness, anxiety, and actions among youth and their parents – A qualitative study of newspaper narratives. Child Adolesc Ment Health 27(1):47–58

51. Aylward B, Cunsolo A, Vriezen R et al. (2022) Climate change is impacting mental health in North America: A systematic scoping review of the hazards, exposures, vulnerabilities, risks and responses. Int Rev Psychiatry 34(1):34–50

52. Lenzer B, Hoffmann C, Hoffmann P et al. (2021) A qualitative study on concerns, needs, and expectations of hospital patients related to climate change: Arguments for a patient-centered adaptation. Int J Environ Res Public Health 18(11):6105

53. First MB, Williams JBW, Karg RS et al. (2016) Structured clinical interview for DSM-5 disorders – Clinican version SCID-5-CV. American Psychiatric Association, Washington, DC

54. Hwong AR, Wang M, Khan H et al. (2022) Climate change and mental health research methods, gaps, and priorities: A scoping review. Lancet Planet Health 6(3):e281–e291

55. Cruz J, White PCL, Bell A et al. (2020) Effect of extreme weather events on mental health: A narrative synthesis and meta-analysis for the UK. Int J Environ Res Public Health 17(22):8581

56. Golitaleb M, Mazaheri E, Bonyadi M et al. (2022) Prevalence of post-traumatic stress disorder after flood: A systematic review and meta-analysis. Front Psychiatry 13:890671

57. Stanke C, Murray V, Amlôt R et al. (2012) The effects of flooding on mental health: Outcomes and recommendations from a review of the literature. PLoS Curr 4:e4f9f1fa9c3cae

58. Milojevic A, Armstrong B, Wilkinson P (2017) Mental health impacts of flooding: A controlled interrupted time series analysis of prescribing data in England. J Epidemiol Community Health 71(10):970–973

59. Motreff Y, Pirard P, Goria S et al. (2013) Increase in psychotropic drug deliveries after the Xynthia storm, France, 2010. Prehosp Disaster Med 28(5):428–433

60. Munro A, Kovats RS, Rubin GJ et al. (2017) Effect of evacuation and displacement on the association between flooding and mental health outcomes: A cross-sectional analysis of UK survey data. Lancet Planet Health 1(4):e134–e141

61. Sheth C, McGlade E, Yurgelun-Todd D (2017) Chronic stress in adolescents and its neurobiological and psychopathological consequences: An RDoC Perspective. Chronic Stress (Thousand Oaks) 1:2470547017715645

62. Wu J, Snell G, Samji H (2020) Climate anxiety in young people: A call to action. Lancet Planet Health 4(10):e435–e436

63. IPCC (2021) Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al. (Hrsg) Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimänderungen. www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf (Stand: 04.06.2023)

64. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022) Zukunft? Jugend fragen! – 2021. Umwelt, Klima, Wandel – was junge Menschen erwarten und wie sie sich engagieren. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. www.bmuv.de/publikation/zukunft-jugend-fragen-2021 (Stand: 04.06.2023)

65. Möller-Slawinski H, Weller D (2021) Ergebnisse einer Repräsentativ-Umfrage unter Jugendlichen – Eine SINUS-Studie im Auftrag der BARMER. BARMER, Heidelberg, Berlin. www.barmer.de/resource/blob/1032266/fa6a3f4ce4789bf63028c271d1ee99ad/sinus-jugendstudie-barmer-data.pdf (Stand: 04.06.2023)

66. R+V Versicherungen (2021) Ergebnisse der R+V-Studie „Die Ängste der Deutschen 2021“. Pressemitteilung vom 09.09.2021. www.presseportal.de/pm/63400/5015775 (Stand: 04.06.2023)

67. Hajek A, König HH (2022) Climate anxiety in Germany. Public Health 212:89–94

68. Meininger J, Ashour R, Dohm L et al. (2022) Empfehlungen zur Berichterstattung über die Klimakrise aus psychologischer Perspektive. Psychologists/Psychotherapists for Future e.V., Bingen. https://medienleitfaden-klima.de/wp-content/uploads/2023/01/Medienleitfaden-Klimakrise-Originalfassung.pdf (Stand: 04.06.2023)

69. Frick V, Holzhauer B, Gossen M (2022) Junge Menschen in der Klimakrise. Eine Untersuchung zu emotionaler Belastung, Bewältigungsstrategien und Unterstützungsangeboten im Kontext von Klimawandel und Umweltproblemen in der Studie „Zukunft? Jugend fragen! 2021”. Umweltbundesamt (Hrsg) Texte 127/2022. www.umweltbundesamt.de/publikationen/junge-menschen-in-der-klimakrise (Stand: 04.06.2023)

70. Schwartz SEO, Benoit L, Clayton S et al. (2022) Climate change anxiety and mental health: Environmental activism as buffer. Curr Psychol:1–14

71. Crenshaw K (1989) Demarginalizing the intersection of race and sex: A black feminist critique of antidiscrimination doctrine, feminist theory and antiracist politics. University of Chicago Legal Forum 1989(1):139–168

72. Hooks B (2000) Feminist theory: From margin to center. Pluto Press, London

73. Merz S, Jaehn P, Mena E et al. (2021) Intersectionality and eco-social theory: A review of potentials for public health knowledge and social justice. Crit Public Health 33(2):1–10

74. Strauß B, Berger U, Rosendahl J (2021) Indirect and direct psychosocial consequences of the corona pandemic – Part 1 of a (preliminary) review. Psychotherapeut (Berl) 66(3):175–185

75. Chen S, Bagrodia R, Pfeffer CC et al. (2020) Anxiety and resilience in the face of natural disasters associated with climate change: A review and methodological critique. J Anxiety Disord 76:102297

76. Deutsche Gesellschaft für Psychiatrie und Psychotherapie, Psychosomatik und Nervenheilkunde e.V. (2021) Klimawandel: Stress für Mensch und Planet. Psychiatrie positioniert sich für den Klimaschutz. Pressemitteilung vom 25.11.2021. https://cc4f-soest.org/klimawandel-stress-fuer-mensch-und-planet-psychiatrie-positioniert-sich-fuer-den-klimaschutz/ (Stand: 04.06.2023)

77. Bundespsychotherapeutenkammer (2021) BPtK-Auswertung: Monatelange Wartezeiten bei Psychotherapeut*innen. Pressemitteilung vom 29. März 2021. www.bptk.de/bptk-auswertung-monatelange-wartezeiten-bei-psychotherapeutinnen/ (Stand: 02.06.2023)

78. Silva JFB, Coburn J (2022) Therapists' experience of climate change: A dialectic between personal and professional. Couns Psychother Res 23:417–431

79. Lewis JL, Haase E, Trope A (2020) Climate dialectics in psychotherapy: Holding open the space between abyss and advance. Psychodyn Psychiatry 48(3):271–294

80. Hayes JA, Gelso CJ, Goldberg S et al. (2018) Countertransference management and effective psychotherapy: Meta-analytic findings. Psychotherapy (Chic) 55(4):496

81. Bundesärztekammer (2021) Klimaschutz ist Gesundheitsschutz. Pressemitteilung vom 20.12.2021. www.bundesaerztekammer.de/presse/informationsdienste/informationsdienst-baekground/detail/klimaschutz-ist-gesundheitsschutz (Stand: 04.11.2022)

82. Pichler PP, Jaccard IS, Weisz U et al. (2019) International comparison of health care carbon footprints. Environ Res Lett 14(6):064004

83. Karliner J, Slotterback S, Boyd R et al. (2019) Health Care's Climate Footprint. How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Health Care Without Harm, Arup. https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf (Stand: 02.06.2023)

Annex Tabelle 1
Suchanfragen der Literaturrecherche pro Schwerpunktthema, formatiert für PubMed. Die zweite Anfrage zielt jeweils auf international publizierte Reviews ohne Bezug zu Deutschland.

Schwerpunktthema: Extremwetterereignisse und psychische Folgen in Deutschland
((climate change[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (climate[Title/Abstract]) OR (weather[Title/Abstract]) OR (flood*[Title/Abstract]) OR (heat wave[Title/Abstract]) OR (extreme weather[Title/Abstract]) OR (hurricane*[Title/Abstract]) OR (tornado*[Title/Abstract]) OR (greenhouse effect[Title/Abstract])) AND ((depression[Title/Abstract]) OR (anxiety[Title/Abstract]) OR (trauma[Title/Abstract]) OR (post-traumatic stress disorder[Title/Abstract]) OR (mood disorder[Title/Abstract]) OR (suicide[Title/Abstract]) OR (substance abuse[Title/Abstract]) OR (alcohol[Title/Abstract]) OR (mania[Title/Abstract]) OR (schizophrenia[Title/Abstract]) OR (bipolar[Title/Abstract]) OR (ptsd[Title/Abstract])) AND ((german[Title/Abstract]) OR (germany[Title/Abstract]) OR (deutsch[Title/Abstract]) OR (Deutschland[Title/Abstract]))
((climate change[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (climate[Title/Abstract]) OR (weather[Title/Abstract]) OR (flood*[Title/Abstract]) OR (heat wave[Title/Abstract]) OR (extreme weather[Title/Abstract]) OR (hurricane*[Title/Abstract]) OR (tornado*[Title/Abstract]) OR (greenhouse effect[Title/Abstract])) AND ((depression[Title/Abstract]) OR (anxiety[Title/Abstract]) OR (trauma[Title/Abstract]) OR (post-traumatic stress disorder[Title/Abstract]) OR (mood disorder[Title/Abstract]) OR (suicide[Title/Abstract]) OR (substance abuse[Title/Abstract]) OR (alcohol[Title/Abstract]) OR (mania[Title/Abstract]) OR (schizophrenia[Title/Abstract]) OR (bipolar[Title/Abstract]) OR (ptsd[Title/Abstract])) AND ((systematic review[Title/Abstract]) OR (meta-analysis[Title/Abstract]) OR (meta analysis[Title/Abstract]) OR (literature review[Title/Abstract]) OR (scoping review[Title/Abstract]))

Schwerpunktthema: Direkte Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Psyche in Deutschland
((heat[Title/Abstract]) OR (hot weather[Title/Abstract]) OR (temperature rise[Title/Abstract]) OR (temperature regulation[Title/Abstract])OR (heat wave[Title/Abstract]) OR (heat waves[Title/Abstract])OR (rising temperature[Title/Abstract]) OR (rising temperatures[Title/Abstract])) AND ((aggression[Title/Abstract]) OR (cognition[Title/Abstract]) OR (cognitive dysfunction[Title/Abstract]) OR (crime[Title/Abstract]) OR (depression[Title/Abstract]) OR (anxiety[Title/Abstract]) OR (trauma[Title/Abstract]) OR (post-traumatic stress disorder[Title/Abstract]) OR (mood disorder[Title/Abstract]) OR (suicide[Title/Abstract]) OR (substance abuse[Title/Abstract]) OR (alcohol[Title/Abstract]) OR (mania[Title/Abstract]) OR (schizophrenia[Title/Abstract]) OR (bipolar[Title/Abstract]) OR (ptsd[Title/Abstract])) AND ((german[Title/Abstract]) OR (germany[Title/Abstract]) OR (deutsch[Title/Abstract]) OR (Deutschland[Title/Abstract]))
((heat[Title/Abstract]) OR (hot weather[Title/Abstract]) OR (temperature rise[Title/Abstract]) OR (temperature regulation[Title/Abstract])OR (heat wave[Title/Abstract])OR (heat waves[Title/Abstract])OR (rising temperature[Title/Abstract])OR (rising temperatures[Title/Abstract])) AND ((aggression[Title/Abstract]) OR (cognition[Title/Abstract]) OR (cognitive dysfunction[Title/Abstract]) OR (crime[Title/Abstract]) OR (depression[Title/Abstract]) OR (anxiety[Title/Abstract]) OR (trauma[Title/Abstract]) OR (post-traumatic stress disorder[Title/Abstract]) OR (mood disorder[Title/Abstract]) OR (suicide[Title/Abstract]) OR (substance abuse[Title/Abstract]) OR (alcohol[Title/Abstract]) OR (mania[Title/Abstract]) OR (schizophrenia[Title/Abstract]) OR (bipolar[Title/Abstract]) OR (ptsd[Title/Abstract])) AND ((systematic review[Title/Abstract]) OR (meta-analysis[Title/Abstract]) OR (meta analysis[Title/Abstract]) OR (literature review[Title/Abstract]) OR (scoping review[Title/Abstract]))

Annex Tabelle 1 *Fortsetzung*
Suchanfragen der Literaturrecherche pro Schwerpunktthema, formatiert für PubMed. Die zweite Anfrage zielt jeweils auf international publizierte Reviews ohne Bezug zu Deutschland.

Schwerpunktthema: Wahrnehmung und innerpsychische Verarbeitung des Klimawandels in Deutschland
((climate change[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (climate crisis[Title/Abstract]) OR (climate[Title/Abstract]) OR (greenhouse effect[Title/Abstract])) AND ((climate anxiety[Title/Abstract]) OR (eco anxiety[Title/Abstract]) OR (eco-anxiety[Title/Abstract]) OR (solastalgia[Title/Abstract]) OR (climate grief[Title/Abstract]) OR (eco grief[Title/Abstract]) OR (ecological grief[Title/Abstract]) OR (eco depression[Title/Abstract]) OR (climate anger[Title/Abstract]) OR (eco anger[Title/Abstract]) OR (eco-anger[Title/Abstract]) OR (eco guilt[Title/Abstract])OR(climate distress[Title/Abstract]) OR (activist burnout[Title/Abstract])OR(active hope[Title/Abstract])OR (beyond hope[Title/Abstract])OR (emotions[Title/Abstract])OR(eco-guilt[Title/Abstract])) AND ((german[Title/Abstract]) OR (germany[Title/Abstract]) OR (deutsch[Title/Abstract]) OR (Deutschland[Title/Abstract]))
((climate change[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (climate crisis[Title/Abstract]) OR (climate[Title/Abstract]) OR (greenhouse effect[Title/Abstract])) AND ((climate anxiety[Title/Abstract]) OR (eco anxiety[Title/Abstract]) OR (eco-anxiety[Title/Abstract]) OR (solastalgia[Title/Abstract]) OR (climate grief[Title/Abstract]) OR (eco grief[Title/Abstract]) OR (ecological grief[Title/Abstract]) OR (eco depression[Title/Abstract]) OR (climate anger[Title/Abstract]) OR (eco anger[Title/Abstract]) OR (eco-anger[Title/Abstract]) OR (eco guilt[Title/Abstract])OR(climate distress[Title/Abstract]) OR (activist burnout[Title/Abstract])OR(active hope[Title/Abstract])OR (beyond hope[Title/Abstract])OR (emotions[Title/Abstract])OR(eco-guilt[Title/Abstract])) AND ((systematic review[Title/Abstract]) OR (meta-analysis[Title/Abstract]) OR (meta analysis[Title/Abstract]) OR (literature review[Title/Abstract]) OR (scoping review[Title/Abstract]))

Schwerpunktthema: Soziologische Aspekte der psychischen Folgen des Klimawandels in Deutschland
((climate[Title/Abstract]) OR (climate change[Title/Abstract])OR (climate crisis[Title/Abstract]) OR (temperature[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (heat build-up[Title/Abstract]) OR (heat[Title/Abstract])OR (temperature fluctuation[Title/Abstract]) OR (variations in temperature[Title/Abstract]) OR (extreme weather events[Title/Abstract]) OR (drought[Title/Abstract]) OR (flood[Title/Abstract])OR (floods[Title/Abstract])OR (flooding[Title/Abstract])OR (sea-level rise[Title/Abstract]) OR (rise in sea level[Title/Abstract])OR (hot house scenario[Title/Abstract])OR (hot bulp[Title/Abstract]) OR (ipcc[Title/Abstract])OR (political ecology[Title/Abstract]) OR (climate-related[Title/Abstract]) OR (climate justice[Title/Abstract])) AND ((mental health[Title/Abstract]) OR (mental illness[Title/Abstract]) OR (mental illnesses[Title/Abstract]) OR (mental disorder[Title/Abstract]) OR (depression[Title/Abstract]) OR (anxiety[Title/Abstract]) OR (trauma[Title/Abstract])OR (post-traumatic stress disorder[Title/Abstract]) OR (mood disorder[Title/Abstract]) OR (suicide[Title/Abstract]) OR (substance abuse[Title/Abstract]) OR (alcohol[Title/Abstract]) OR (mania[Title/Abstract]) OR (schizophrenia[Title/Abstract]) OR (bipolar[Title/Abstract]) OR (ptsd[Title/Abstract]) OR (sucidal[Title/Abstract]) OR (well being[Title/Abstract]) OR (well-being[Title/Abstract]) OR (quality of life[Title/Abstract])) AND ((emotional identification[Title/Abstract]) OR (terror management theory[Title/Abstract]) OR (communal well-being[Title/Abstract]) OR (communal well being[Title/Abstract]) OR (health infrastructure[Title/Abstract]) OR (social infrastructure[Title/Abstract]) OR (family cohesion[Title/Abstract]) OR (social determinants of health[Title/Abstract]) OR (aggression[Title/Abstract]) OR (violence[Title/Abstract]) OR (femicide[Title/Abstract]) OR (communal health[Title/Abstract]) OR (stress proliferation[Title/Abstract]) OR (disability[Title/Abstract]) OR (disabilities[Title/Abstract]) OR (lgbtq[Title/Abstract]) OR (indigene[Title/Abstract]) OR (seniors[Title/Abstract]) OR (children[Title/Abstract]) OR (youth[Title/Abstract]) OR (neurodiversity[Title/Abstract]) OR (refugees[Title/Abstract]) OR (asylum[Title/Abstract]) OR (spatial disparity[Title/Abstract]) OR (spatial disparities[Title/Abstract]) OR (neighborhood[Title/Abstract]) OR (neighborhoods[Title/Abstract]) OR (neighbourhood[Title/Abstract]) OR (neighbourhoods[Title/Abstract]) OR (racism[Title/Abstract]) OR (ethnic minority[Title/Abstract]) OR (ethnic minorities[Title/Abstract]) OR (sinti[Title/Abstract]) OR (roma[Title/Abstract]) OR (religion[Title/Abstract]) OR (islamophobia[Title/Abstract]) OR (antisemitism[Title/Abstract]) OR (antiziganims[Title/Abstract]) OR (sexism[Title/Abstract]) OR (capitalism[Title/Abstract]) OR (patriarchy[Title/Abstract]) OR (colonialism[Title/Abstract]) OR (group based discrimination[Title/Abstract]) OR (homelessness[Title/Abstract])OR (education[Title/Abstract]) OR (inequality[Title/Abstract])) AND ((german[Title/Abstract]) OR (germany[Title/Abstract]) OR (deutsch[Title/Abstract]) OR (Deutschland[Title/Abstract]))

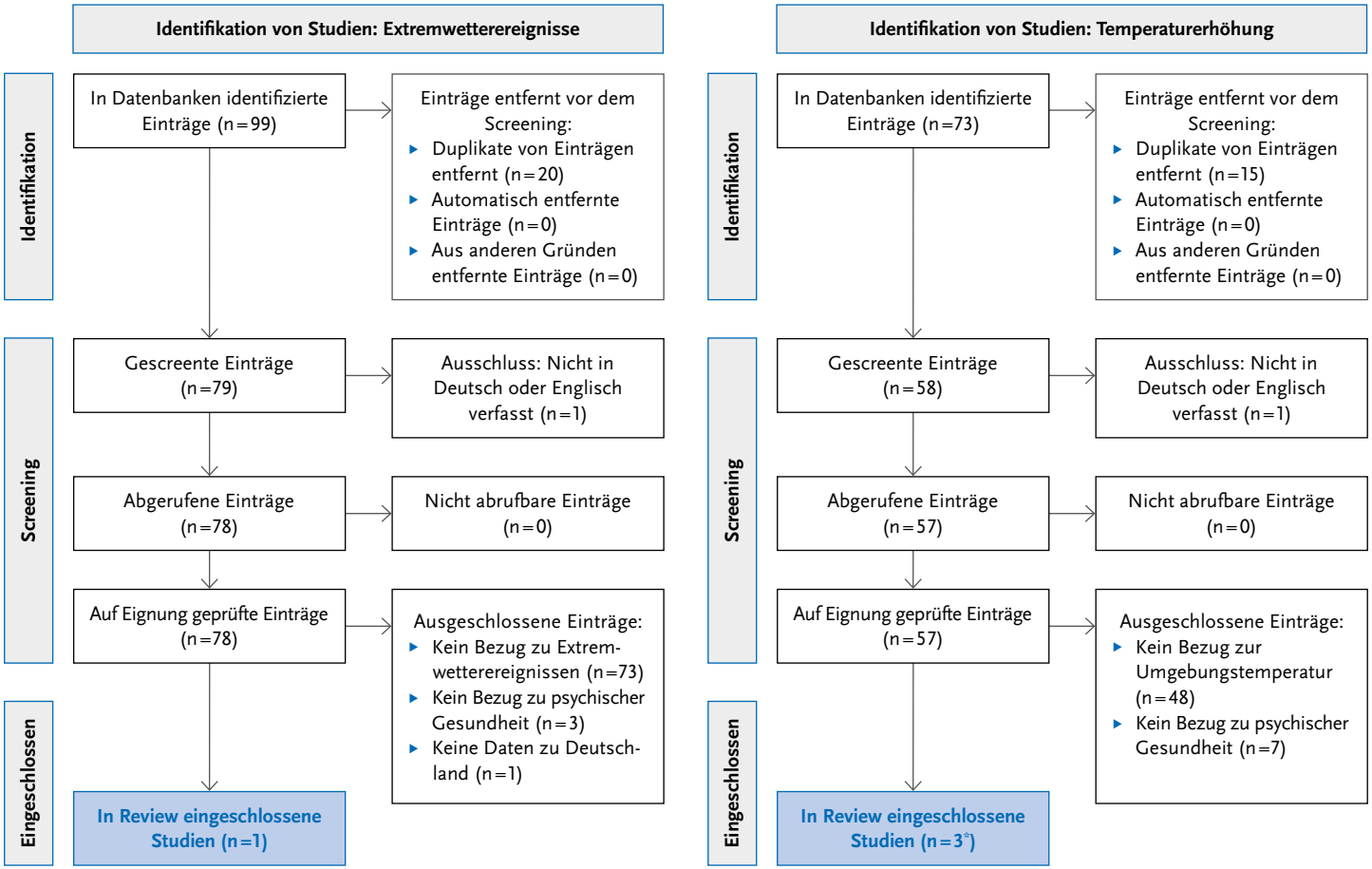
Annex Tabelle 1 *Fortsetzung*
Suchanfragen der Literaturrecherche pro Schwerpunktthema, formatiert für PubMed. Die zweite Anfrage zielt jeweils auf international publizierte Reviews ohne Bezug zu Deutschland.

((climate[Title/Abstract]) OR (climate change[Title/Abstract])OR (climate crisis[Title/Abstract]) OR (temperature[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (heat build-up[Title/Abstract]) OR (heat[Title/Abstract])OR (temperature fluctuation[Title/Abstract]) OR (variations in temperature[Title/Abstract]) OR (extreme weather events[Title/Abstract]) OR (drought[Title/Abstract]) OR (flood[Title/Abstract])OR (floods[Title/Abstract])OR (flooding[Title/Abstract])OR (sea-level rise[Title/Abstract]) OR (rise in sea level[Title/Abstract])OR (hot house scenario[Title/Abstract])OR (hot bulp[Title/Abstract]) OR (ipcc[Title/Abstract])OR (political ecology[Title/Abstract]) OR (climate-related[Title/Abstract]) OR (climate justice[Title/Abstract])) AND ((mental health[Title/Abstract]) OR (mental illness[Title/Abstract]) OR (mental illnesses[Title/Abstract]) OR (mental disorder[Title/Abstract]) OR (depression[Title/Abstract]) OR (anxiety[Title/Abstract]) OR (trauma[Title/Abstract])OR (post-traumatic stress disorder[Title/Abstract]) OR (mood disorder[Title/Abstract]) OR (suicide[Title/Abstract]) OR (substance abuse[Title/Abstract]) OR (alcohol[Title/Abstract]) OR (mania[Title/Abstract]) OR (schizophrenia[Title/Abstract]) OR (bipolar[Title/Abstract]) OR (ptsd[Title/Abstract]) OR (sucidal[Title/Abstract]) OR (well being[Title/Abstract]) OR (well-being[Title/Abstract]) OR (quality of life[Title/Abstract])) AND ((emotional identification[Title/Abstract]) OR (terror management theory[Title/Abstract]) OR (communal well-being[Title/Abstract]) OR (communal well being[Title/Abstract]) OR (health infrastructure[Title/Abstract]) OR (social infrastructure[Title/Abstract]) OR (family cohesion[Title/Abstract]) OR (social determinants of health[Title/Abstract]) OR (aggression[Title/Abstract]) OR (violence[Title/Abstract]) OR (femicide[Title/Abstract]) OR (communal health[Title/Abstract]) OR (stress proliferation[Title/Abstract]) OR (disability[Title/Abstract]) OR (disabilities[Title/Abstract]) OR (lgbtq[Title/Abstract]) OR (indigene[Title/Abstract]) OR (seniors[Title/Abstract]) OR (children[Title/Abstract]) OR (youth[Title/Abstract]) OR (neurodiversity[Title/Abstract]) OR (refugees[Title/Abstract]) OR (asylum[Title/Abstract]) OR (spatial disparity[Title/Abstract]) OR (spatial disparities[Title/Abstract]) OR (neighborhood[Title/Abstract]) OR (neighborhoods[Title/Abstract]) OR (neighbourhood[Title/Abstract]) OR (neighbourhoods[Title/Abstract]) OR (racism[Title/Abstract]) OR (ethnic minority[Title/Abstract]) OR (ethnic minorities[Title/Abstract]) OR (sinti[Title/Abstract]) OR (roma[Title/Abstract]) OR (religion[Title/Abstract]) OR (islamophobia[Title/Abstract]) OR (antisemitism[Title/Abstract]) OR (antiziganims[Title/Abstract]) OR (sexism[Title/Abstract]) OR (capitalism[Title/Abstract]) OR (patriarchy[Title/Abstract]) OR (colonialism[Title/Abstract]) OR (group based discrimination[Title/Abstract]) OR (homelessness[Title/Abstract])OR (education[Title/Abstract]) OR (inequality[Title/Abstract])) AND ((systematic review[Title/Abstract]) OR (meta-analysis[Title/Abstract]) OR (meta analysis[Title/Abstract]) OR (literature review[Title/Abstract]) OR (scoping review[Title/Abstract]))
Schwerpunktthema: Resilienzfaktoren für die psychische Stabilität im Kontext Klimawandel in Deutschland
((climate change[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (climate crisis[Title/Abstract]) OR (climate[Title/Abstract]) OR (greenhouse effect[Title/Abstract])) AND ((resilience[Title/Abstract]) OR (protective factor[Title/Abstract]) OR (adaption[Title/Abstract]) OR (coping[Title/Abstract]) OR (adjustment[Title/Abstract]) OR (risk factor[Title/Abstract])) AND ((mental[Title/Abstract]) OR (psychological[Title/Abstract]) OR (well-being[Title/Abstract]) OR (well being[Title/Abstract]) OR (behavioral[Title/Abstract]) OR (behavioural[Title/Abstract])OR(psychosocial[Title/Abstract]) OR (life satisfaction[Title/Abstract])OR(quality of life[Title/Abstract])) AND ((german[Title/Abstract]) OR (germany[Title/Abstract]) OR (deutsch[Title/Abstract]) OR (Deutschland[Title/Abstract]))
((climate change[Title/Abstract]) OR (global warming[Title/Abstract]) OR (climate crisis[Title/Abstract]) OR (climate[Title/Abstract]) OR (greenhouse effect[Title/Abstract])) AND ((resilience[Title/Abstract]) OR (protective factor[Title/Abstract]) OR (adaption[Title/Abstract]) OR (coping[Title/Abstract]) OR (adjustment[Title/Abstract]) OR (risk factor[Title/Abstract])) AND ((mental[Title/Abstract]) OR (psychological[Title/Abstract]) OR (well-being[Title/Abstract]) OR (well being[Title/Abstract]) OR (behavioral[Title/Abstract]) OR (behavioural[Title/Abstract])OR(psychosocial[Title/Abstract]) OR (life satisfaction[Title/Abstract])OR(quality of life[Title/Abstract])) AND ((systematic review[Title/Abstract]) OR (meta-analysis[Title/Abstract]) OR (meta analysis[Title/Abstract]) OR (literature review[Title/Abstract]) OR (scoping review[Title/Abstract]))

Annex Abbildung 1
Flussdiagramme zur Identifikation von Studien pro Schwerpunktthema

Annex Abbildung 1a (links)
Extremwetterereignisse

Annex Abbildung 1b (rechts)
Temperaturerhöhung

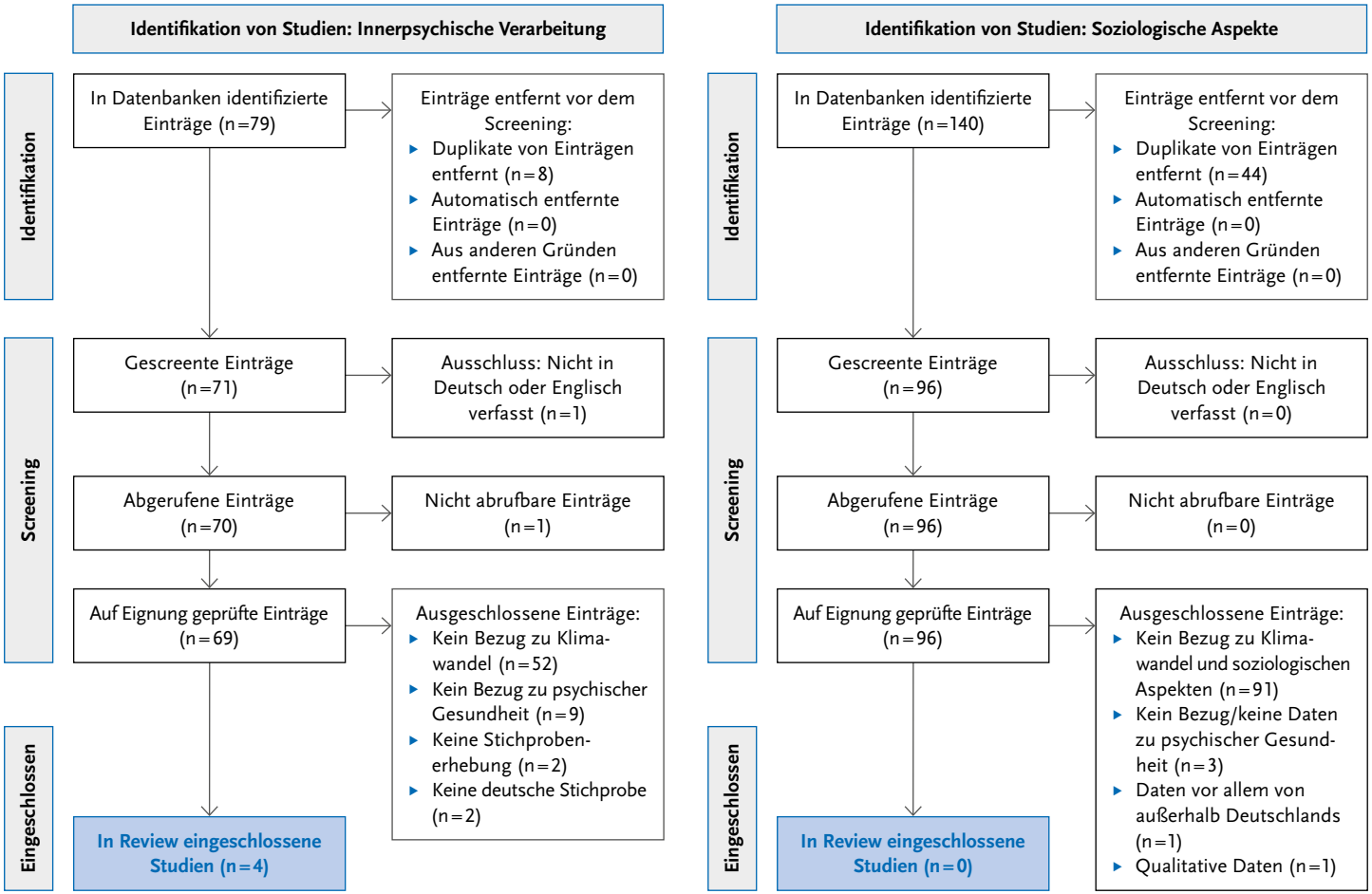


* Eine Studie wurde nach Prüfung der Einträge für das Thema soziologische Aspekte inkludiert

Annex Abbildung 1 *Fortsetzung*
Flussdiagramme zur Identifikation von Studien pro Schwerpunktthema

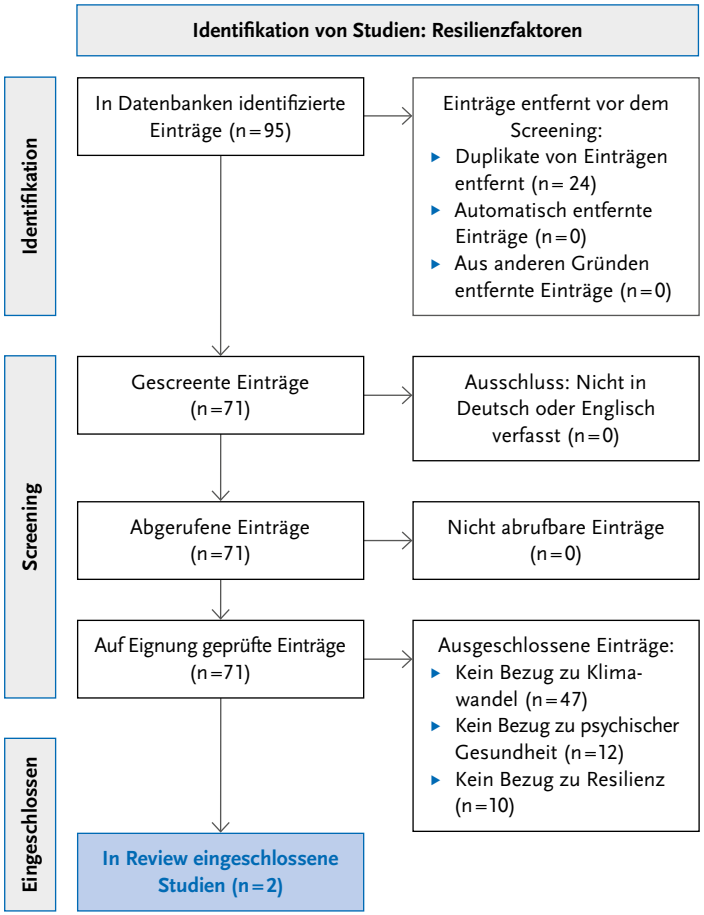
Annex Abbildung 1c (links)
Innerpsychische Verarbeitung

Annex Abbildung 1d (rechts)
Soziologische Aspekte



Annex Abbildung 1 *Fortsetzung*
Flussdiagramme zur Identifikation von Studien pro Schwerpunktthema:

Annex Abbildung 1e
Resilienzfaktoren



Impressum

Journal of Health Monitoring
www.rki.de/jhealthmonit

Herausgeber
Robert Koch-Institut
Nordufer 20
13353 Berlin

Redaktion
Abteilung für Epidemiologie und Gesundheitsmonitoring
Fachgebiet Gesundheitsberichterstattung
General-Pape-Str. 62–66
12101 Berlin
Tel.: 030-18 754-3400
E-Mail: healthmonitoring@rki.de

Verantwortlicher Redakteur
Dr. Thomas Ziese
Stellvertretung: Dr. Anke-Christine Saß

Redakteurinnen
Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter, Dr. Kirsten Kelleher,
Dr. Livia Ryl, Simone Stimm

Satz
WEBERSUPIRAN.berlin, Alexander Krönke

Bildnachweis
Illustration auf Titel und Marginalspalte:
© elenabsl – stock.adobe.com

ISSN 2511-2708

Hinweis
Inhalte externer Beiträge spiegeln nicht notwendigerweise die
Meinung des Robert Koch-Instituts wider.

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0
International Lizenz.

Das Robert Koch-Institut ist ein Bundesinstitut im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit