

Journal of Health Monitoring · 2023 8(S3)

DOI 10.25646/11395

Robert Koch-Institut, Berlin

Annika Meinen, Sara Tomczyk, Flora Noelle
Wiegand, Muna Abu Sin, Tim Eckmanns,
Sebastian Haller

Robert Koch-Institut, Berlin
Abteilung für Infektionsepidemiologie

Eingereicht: 15.11.2022

Akzeptiert: 06.02.2023

Veröffentlicht: 01.06.2023

Antibiotikaresistenz in Deutschland und Europa – Ein systematischer Review zur zunehmenden Bedrohung, beschleunigt durch den Klimawandel

Abstract

Hintergrund: Antimikrobielle Resistenz (AMR) gehört neben dem Klimawandel zu den zehn größten globalen Bedrohungen für Public Health. Hier werden Auswirkungen des Klimawandels wie Temperaturanstieg, Veränderung der Luftfeuchtigkeit oder des Niederschlags auf die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen und auf Infektionen mit antibiotikaresistenten Bakterien in Deutschland zusammengefasst.

Methode: Es wurde ein Literaturreview durchgeführt, der Artikel einschloss, die zwischen Januar 2012 und Juli 2022 veröffentlicht wurden. Zwei Autorinnen sichteten Titel, Abstracts und Volltexte und extrahierten die Daten systematisch.

Ergebnisse: Von 2.389 potenziell relevanten Titeln erfüllten sechs Studien die Einschlusskriterien. Sie zeigen, dass ein Anstieg der Umgebungstemperatur zu höheren Antibiotikaresistenzraten und einem erhöhten Risiko für Besiedlung mit und Verbreitung von antibiotikaresistenten Erregern führen kann. Weiterhin steigt die Anzahl nosokomialer Infektionen. Einige Studien zeigen einen höheren Antibiotikaverbrauch bei wärmeren Durchschnittstemperaturen.

Schlussfolgerungen: Für Europa liegen nur wenige Studien vor, jedoch deuten sie darauf hin, dass die AMR-Krankheitslast durch den Klimawandel weiter verstärkt wird. Weitere Studien sind notwendig, um die Zusammenhänge zwischen klimatischen Faktoren und AMR zu untersuchen und gezielte Präventionsmaßnahmen weiterzuentwickeln.

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

◆ KLIMAWANDEL · ANTIMIKROBIELLE RESISTENZ UND VERBRAUCH · NOSOKOMIALE INFEKTIONEN

1. Einführung

Der Klimawandel hat Auswirkungen auf die weltweite Krankheitslast, und es gibt ausreichend Anhaltspunkte dafür, dass jetzt gehandelt werden muss, um die Klimakrise abzumildern. Es bleibt jedoch schwierig, die Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Krankheiten zu quantifizie-

ren. Die Komplexität der vom Klima abhängigen Faktoren, die wiederum Infektionskrankheiten beeinflussen, stellt eine Herausforderung für die Berechnungen und Modellierungen zu deren Auswirkungen dar.

Seitdem antimikrobielle Substanzen zur Verfügung stehen, sind Infektionen durch Bakterien, Viren, Pilze und Parasiten behandelbar geworden. Durch übermäßigen und nicht

Der Klimawandel und AMR gehören zu den größten und komplexesten Bedrohungen für die Welt. Beide werden durch menschliches Handeln verschärft, können aber durch veränderte Handlungsweisen eingedämmt werden.

sachgerechten Einsatz von antimikrobiellen Arzneimitteln werden diese Erreger jedoch zunehmend resistent. Im Jahr 2019 erklärte die Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) antimikrobielle Resistenz (AMR) neben dem Klimawandel zu einer der zehn größten globalen Bedrohungen für die öffentliche Gesundheit der Menschheit [1, 2]. Laut einer aktuellen Studie zur globalen Krankheitslast durch AMR standen im Jahr 2019 schätzungsweise 4,95 Millionen Todesfälle mit bakteriellen AMR-Infektionen in Verbindung (d. h. Todesfälle aufgrund einer Infektion mit resistenten Bakterien, z.T. zurückzuführen auf Antibiotikaresistenz, z. T. auf den Krankheitsverlauf der bakteriellen Infektion). Die Anzahl der Todesfälle aufgrund einer bakteriellen Infektion, bei denen die Antibiotikaresistenz, also die nicht Behandelbarkeit der Infektion allein Ursache des Versterbens war, lag bei 1,27 Millionen [3]. Cassini et al. [4] schätzten die Krankheitslast durch Infektionen mit antibiotikaresistenten Bakterien in europäischen Ländern im Jahr 2015 ein und identifizierten vier antibiotikaresistente Bakterien mit der größten Auswirkung auf die menschliche Gesundheit: 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *Escherichia coli* (*E. coli*), Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), Carbapenem-resistente *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) und 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *Klebsiella pneumoniae* (*K. pneumoniae*). Diese Ergebnisse wurden kürzlich von Mestrovic et al. [5] in einer weiteren europäischen systematischen Analyse aus dem Jahr 2019 bestätigt. In dieser Studie wurden die regionalen Unterschiede in der AMR-Krankheitslast in Europa untersucht, wobei sich zeigte, dass die AMR-Krankheitslast in Ländern des Mittelmeerraums, wie Griechenland oder Italien, höher ist als in Ländern des nordeuropäischen

Raums. Dies könnte unter anderem mit klimatischen Unterschieden zusammenhängen [4]. Darüber hinaus schätzt die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD), dass 75% der AMR-Krankheitslast auf nosokomiale Infektionen (healthcare-associated infections, HAIs) zurückzuführen sind [6].

Es ist bekannt, dass die Temperatur, welche aufgrund des Klimawandels steigen könnte [7], Auswirkungen auf das Wachstum und die Vermehrung von Bakterien hat. Die optimale Wachstumstemperatur für viele Bakterien liegt bei über 30 °C [8]. Es gibt Hinweise darauf, dass der Plasmidtransfer und möglicherweise auch der Gentransfer von Resistenzgenen durch eine höhere Temperatur begünstigt werden [9]. Kürzlich wurden auch Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Klimafaktoren wie der Temperatur und AMR gefunden. So stellen MacFadden et al. [10] fest, dass AMR bei verbreiteten Krankheitserregern wie *S. aureus*, *E. coli* und *K. pneumoniae* mit steigender Temperatur zunimmt.

In der vorliegenden Übersichtsarbeit werden die wichtigsten Auswirkungen zusammengefasst, die der Klimawandel auf die Ausbreitung und Belastung durch AMR beim Menschen in Deutschland und Europa haben könnte. Hierfür wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und ein grafisches Modell angepasst.

2. Methode

Die systematische Literatursuche beschränkte sich auf durch Peer Review begutachtete Artikel, die zwischen Januar 2012 und Juli 2022 in englischer, französischer oder deut-

scher Sprache veröffentlicht wurden. Die Literaturdatenbank PubMed wurde mit den englischen Schlüsselbegriffen für Klimawandel, Temperatur, HAIs und AMR durchsucht, einschließlich der MeSH-Begriffe für Klimawandel, globale Erwärmung, klimatische Prozesse und antibakterielle Wirkstoffe sowie Antibiotikaresistenz. Der vollständige englische Suchstring ist im [Annex](#) dokumentiert. Weitere Literatur wurde durch Suche in Literaturverzeichnissen ausgewählter Artikel gefunden. Es wurden nur Studien berücksichtigt, die Länder der Europäischen Union (EU) und/oder des Europäischen Wirtschaftsraums (EWR) einschließen, sowie Primäranalysen oder Reviews (z. B. wurden Editorials ausgeschlossen). Bei dieser systematischen Übersichtsarbeit wurde die PRISMA-Erklärung (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) berücksichtigt [11].

Zwei Autorinnen (A.M. und F.W.) überprüften unabhängig voneinander Titel, Abstracts sowie Volltexte und extrahierten systematisch die folgenden Daten: Zitierung, Studienzeitraum, Studiendesign, demografische Daten, Klimaindikatoren, Definition der Ergebnisse als Erreger und/oder Antibiotikaresistenz und/oder analysierte Infektionen. Unstimmigkeiten wurden durch Diskussion gelöst bis ein Konsens erzielt wurde. Die Daten wurden in Tabellen zusammengefasst und nach Arzneimittelresistenz, Krankheitserreger und Art der Infektion stratifiziert.

Darüber hinaus wurde das von Mora et al. [12] bereitgestellte Webtool genutzt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf AMR-Erreger zu veranschaulichen. Auf der Grundlage einer umfassenden Übersichtsarbeit zu verfügbarer Literatur und Daten ermöglicht das Tool die Modellierung der Übertragungswege, durch die sich klimati-

sche Risiken auf bestimmte Krankheiten auswirken. Die Autorinnen und Autoren haben die Erkenntnisse über globale Klimarisiken umfassend bewertet. Wir haben für diese Arbeit das Modell angepasst und den Fokus auf die wichtigsten AMR-Erreger nach Cassini et al. [4] in Europa gelegt.

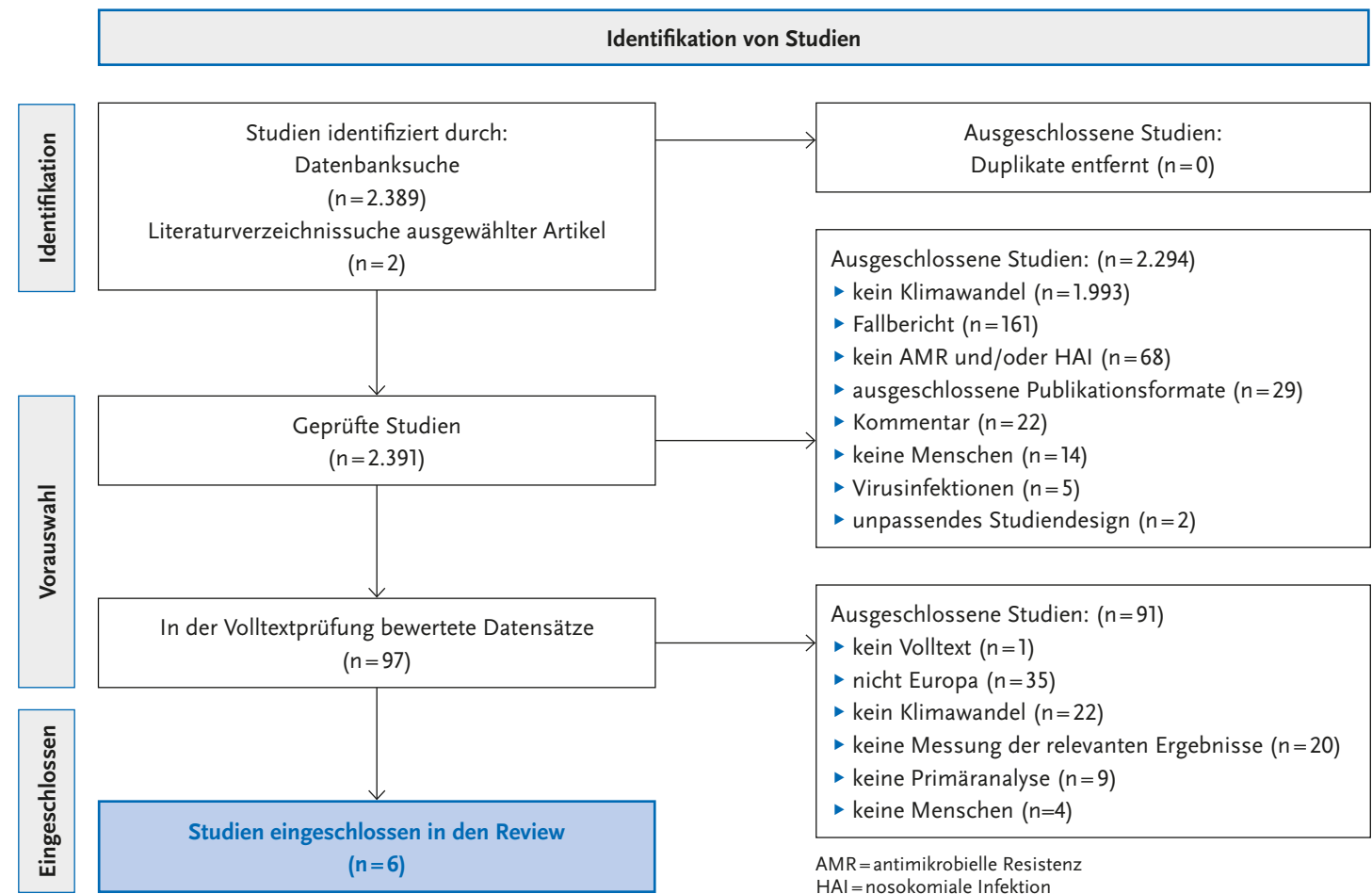
3. Ergebnisse

Auf Basis der systematischen Suche wurden insgesamt 2.389 Titel ermittelt ([Abbildung 1](#)). Nach Ausschluss von Duplikaten und dem Screening der verbleibenden Titel und Abstracts blieben 97 Publikationen für die Volltextauswertung übrig. Von diesen erfüllten nur sechs Studien unsere Einschlusskriterien ([Tabelle 1](#)). Da sich der vorliegende Beitrag auf die Situation in Deutschland und den EU/EWR-Ländern konzentriert, werden die außereuropäischen Studien (n=35) für diese Übersichtsarbeit ausgeschlossen. Die eingeschlossenen Studien waren vorwiegend Beobachtungsstudien.

3.1 Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und Auftreten von AMR

Anhand von Daten des European Antimicrobial Resistance Surveillance Network (EARS-Net) zeigten McGough et al. [14], dass AMR bei *E. coli* und *K. pneumoniae* zwischen 2000 und 2016 zunahm, während die Zahl der Methicillinresistenten *S. aureus* (MRSA) im Laufe der Zeit zurückging. Der Rückgang der MRSA-Nachweise wird gemeinhin auf gezielte Maßnahmen zurückgeführt und kann eher nicht durch Klimaindikatoren erklärt werden [19]. Kaba et al. [13]

Abbildung 1
Darstellung der Literatursuche in Anlehnung
an das PRISMA-Flussdiagramm [11]



und McGough et al. [14] zeigten eine Korrelation zwischen wärmeren Temperaturen (ausgedrückt als mittlere Temperatur oder als minimale Umgebungstemperatur) und einer Zunahme der Antibiotikaresistenz. Die mittlere Temperatur der warmen Jahreszeit wurde als Prädiktor für MRSA, multiresistente *E. coli* (MREC) und Carbapenem-resistente *K. pneumoniae* (CRKP) ermittelt.

Es zeigte sich, dass mit steigender Durchschnittstemperatur die Raten von MRSA, MREC und CRKP zunehmen [13]. Darüber hinaus wiesen McGough et al. [14] nach, dass AMR bei höheren Temperaturen schneller zunimmt. In wärmeren Ländern, in denen die Durchschnittstemperatur 10°C höher ist als die allgemeine Durchschnittstemperatur in europäischen Ländern, wurde eine erhöhte Änderungsrate

Tabelle 1

Informationen zu den sechs Studien, die die Einschlusskriterien erfüllten. Die Studien sind nach Autor, gemessener Exposition (Klimafaktoren), Ergebnis (AMR und/oder Infektion) sortiert, die Ergebnisse sind zusammengefasst.

Erstautor oder -autorin, Jahr der Veröffentlichung	Beobachtungszeitraum	Land	Datenquelle	Aufbau der Studie	Messung der Exposition	Messung des Ergebnisses	Ergebnisse
Kaba [13], 2020	2011–2016	30 Länder (alle EU- und EWR-Mitglieder, sowie Island und Norwegen)	EARS-Net-Surveillancedaten (Routine-AST-Ergebnisse werden von klinischen Laboratorien durch das nationale Netzwerk gesammelt); historische Temperaturdaten	Ökologische Beobachtungsstudie	Historische monatliche Durchschnittstemperatur	Jährliche nationale AMR-Prävalenz (CRPA, CRKP, MREC, MRSA)	Signifikante Korrelation zwischen der mittleren Temperatur der warmen Jahreszeit (Mai–Oktober) und MRSA ($R_s=0,826$), MREC ($R_s=0,718$) und CRKP ($R_s=0,798$); Korrelation zwischen der mittleren Temperatur der kalten Jahreszeit (November–April) und MRSA ($R_s=0,691$); Korrelation mit der Netto-Temperaturänderung in der warmen Jahreszeit und CRPA ($R_s=0,748$) und MREC ($R_s=0,617$); die mittlere Temperatur in der warmen Jahreszeit ist ein signifikanter Prädiktor für MRSA, MREC und CRKP, aber nicht für CRPA.
McCough [14], 2020	2000–2016	28 europäische Länder (alle EU- und EWR-Mitglieder sowie Island, Norwegen und das Vereinigte Königreich)	EARS-Netz-Surveillancedaten (Routine-AST-Ergebnisse werden von klinischen Laboratorien durch das nationale Netzwerk gesammelt); modellierte und assimilierte meteorologische Daten, verfügbar unter Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)	Ökologische Beobachtungsstudie	Jährliche minimale Umgebungstemperatur	Jährliche nationale AMR-Prävalenz (Aminopenicilline (<i>E. coli</i>), 3.-Generations-Cephalosporine (<i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i>), Fluorchinolone (<i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i>), Aminoglycoside (<i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i>) und Methicillin (<i>S. aureus</i>))	AMR bei <i>E. coli</i> und <i>K. pneumoniae</i> nahm in den meisten europäischen Ländern im Laufe der Zeit zu, MRSA nahm im Allgemeinen im Laufe der Zeit ab; positiver linearer Zusammenhang zwischen minimaler Umgebungstemperatur und AMR in allen Ländern, Jahren, Krankheitserregern und Antibiotika-Unterklassen; Beziehung zwischen Temperatur und Resistenz nimmt mit der Zeit zu, und AMR nimmt bei höheren Temperaturen schneller zu.

AMR=antimikrobielle Resistenz, AOR=Adjustierte Odds Ratio, AST=antimikrobielle Empfindlichkeitstests, *C. albicans*=*Candida albicans*, *C. difficile*=*Clostridioides difficile*, CRE=Carbapenem-resistente Enterobacterales, CRKP=Carbapenem-resistente *K. pneumoniae*, CRPA=Carbapenem-resistente *P. aeruginosa*, DWD=Deutscher Wetterdienst, EARS-Net=European Antimicrobial Resistance Surveillance Network, EWR=Europäischer Wirtschaftsraum, EU=Europäische Union, ha-BSI=nosokomiale Blutstrominfektion, ICU=Intensivstation, IRR=Inzidenzratenverhältnis, KI=Konfidenzintervall, KISS=Krankenhaus-Infektions-Surveillance-System, MRSA=Methicillin-resistente *S. aureus*, MREC=multiresistente *E. coli*, R_s =Spearman-Rangkorrelationskoeffizient, SSI=postoperative Wundinfektion, *S. pneumoniae*=*Streptococcus pneumoniae*

Fortsetzung nächste Seite

Erstautor oder -autorin, Jahr der Veröffentlichung	Beobachtungszeitraum	Land	Datenquelle	Aufbau der Studie	Messung der Exposition	Messung des Ergebnisses	Ergebnisse
Forrester [15], 2022	1990–2020	22 Länder: 15 europäische Länder, 7 Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen	101 Veröffentlichungen	Review	Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Jahreszeiten	Infektion oder Besiedlung mit gängigen antibiotikaresistenten oder antibiotikaassoziierten Krankheitserregern (MRSA, <i>C. difficile</i> , CRE)	MRSA: Höhere Temperaturen und höhere Luftfeuchtigkeit erhöhen nachweislich die Besiedlung und Infektion mit MRSA ; <i>C. difficile</i> : Es wurde berichtet, dass sich die Jahreszeit auf die Besiedlung oder Infektion mit <i>C. difficile</i> auswirkt und in der südlichen (Oktober–November) und nördlichen Hemisphäre (März–April) unterschiedlich ist.
Aghdassi [16]*, 2019	2000–2016	Deutschland	Chirurgische Eingriffe und SSIs von KISS; Daten der meteorologischen Messstationen des DWD	Ökologische Beobachtungsstudie	Monatliche Durchschnittstemperatur	SSI-Raten pro 1.000 Operationen	Die Zahl der SSIs pro 1.000 Operationen nahm mit höheren Temperaturen zu; SSIs bei Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ wahrscheinlicher als bei Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$ (AOR: 1,13 [95 %-KI: 1,06–1,20]) ; Auftreten von oberflächlichen SSIs mit gramnegativen Erregern um bis zu 38% wahrscheinlicher bei Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ (AOR: 1,38 [95 %-KI: 1,16–1,64]) als bei Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$; die Zahl der SSIs pro 1.000 Operationen stieg um 1% pro 1°C Anstieg.
Schwab [17], 2020	2001–2015	Deutschland	SSIs von Intensivstationen, die am Modul „ICU-KISS“ von KISS teilnehmen; Daten der meteorologischen Messstationen des DWD	Ökologische Beobachtungsstudie	Tagesmitteltemperatur, Tageshöchsttemperatur, Tagesniederschlag, relative Luftfeuchtigkeit und die tägliche Sonneneindauer	Inzidenz von primären nosokomialen Blutstrominfektionen (ha-BSIs) stratifiziert nach Erregern pro 10.000 Patiententage	Inzidenz von ha-BSIs 17% (IRR: 1,169 [95 %-KI: 1,077–1,269]) höher in Monaten $> 20^\circ\text{C}$ im Vergleich zu Monaten $< 5^\circ\text{C}$; dieser Effekt ist um ein Drittel (38%) höher für gramnegative Erreger und 13% höher für grampositive Erreger; <i>S. pneumoniae</i> trat 50% seltener in Monaten $> 20^\circ\text{C}$ als bei $< 5^\circ\text{C}$ auf.

AMR=antimikrobielle Resistenz, AOR=Adjustierte Odds Ratio, AST=antimikrobielle Empfindlichkeitstests, *C. albicans*=*Candida albicans*, *C. difficile*=*Clostridioides difficile*, CRE=Carbapenem-resistente Enterobacterales, CRKP=Carbapenem-resistente *K. pneumoniae*, CRPA=Carbapenem-resistente *P. aeruginosa*, DWD=Deutscher Wetterdienst, EARS-Net=European Antimicrobial Resistance Surveillance Network, EWR=Europäischer Wirtschaftsraum, EU=Europäische Union, ha-BSI=nosokomiale Blutstrominfektion, ICU=Intensivstation, IRR=Inzidenzratenverhältnis, KI=Konfidenzintervall, KISS=Krankenhaus-Infektions-Surveillance-System, MRSA=Methicillin-resistente *S. aureus*, MREC=multiresistente *E. coli*, Rs=Spearman-Rangkorrelationskoeffizient, SSI=postoperative Wundinfektion, *S. pneumoniae*=*Streptococcus pneumoniae*

* Beide Artikel verwenden denselben Datensatz und sollten als Einheit betrachtet werden.

Fortsetzung nächste Seite

Erstautor oder -autorin, Jahr der Veröffentlichung	Beobachtungszeitraum	Land	Datenquelle	Aufbau der Studie	Messung der Exposition	Messung des Ergebnisses	Ergebnisse
Aghdassi [18]*, 2021	2000–2016	Deutschland	Chirurgische Eingriffe und SSIs aus dem Modul „OP-KISS“ von KISS, DWD-Daten	Ökologische Beobachtungsstudie	Monatliche Durchschnittstemperatur	Raten der SSIs pro 1.000 Operationen, stratifiziert nach Erregern (<i>S. aureus</i> , <i>Enterococcus</i> spp., Koagulase-negative Staphylokokken, <i>Streptococcus</i> spp., <i>Corynebacterium</i> spp., <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>Enterobacter</i> spp., <i>Klebsiella</i> spp., <i>Proteus</i> spp., <i>Bacteroides</i> spp., <i>Citrobacter</i> spp., andere Enterobacterales, <i>Serratia</i> spp., <i>Acinetobacter</i> spp., <i>C. albicans</i>)	Korrelation zwischen höheren Temperaturen und dem Auftreten von SSIs; Anstieg der SSI-Rate pro zusätzlicher 1 °C für fast alle Erreger mit Ausnahme von <i>Streptococcus</i> spp. und <i>C. albicans</i>; stärkste Assoziation für das Risiko für SSIs mit <i>Acinetobacter</i> spp. (6% Anstieg pro zusätzlicher 1 °C) und <i>Enterobacter</i> spp. (4% Anstieg pro zusätzlicher 1 °C); das Risiko für SSIs durch <i>Acinetobacter</i> spp. und <i>Enterobacter</i> spp. stieg in Monaten mit ≥ 20 °C im Vergleich zu < 5 °C um mehr als das Zweifache.

AMR=antimikrobielle Resistenz, AOR=Adjustierte Odds Ratio, AST=antimikrobielle Empfindlichkeitstests, *C. albicans*=*Candida albicans*, *C. difficile*=*Clostridioides difficile*, CRE=Carbapenem-resistente Enterobacterales, CRKP=Carbapenem-resistente *K. pneumoniae*, CRPA=Carbapenem-resistente *P. aeruginosa*, DWD=Deutscher Wetterdienst, EARS-Net=European Antimicrobial Resistance Surveillance Network, EWR=Europäischer Wirtschaftsraum, EU=Europäische Union, ha-BSI=nosokomiale Blutstrominfektion, ICU=Intensivstation, IRR=Inzidenzratenverhältnis, KI=Konfidenzintervall, KISS=Krankenhaus-Infektions-Surveillance-System, MRSA=Methicillin-resistente *S. aureus*, MREC=multiresistente *E. coli*, Rs=Spearman-Rangkorrelationskoeffizient, SSI=postoperative Wundinfektion, *S. pneumoniae*=*Streptococcus pneumoniae*

* Beide Artikel verwenden denselben Datensatz und sollten als Einheit betrachtet werden.

von AMR um 0,33 % pro Jahr für Aminoglykosid-resistente *E. coli* und 0,55 % pro Jahr für 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *E. coli* beobachtet. Bei Fluorchinolon-resistenten *E. coli* wurde ein Anstieg von 0,57 % pro Jahr festgestellt, nachdem andere bekannte Einflussfaktoren, wie Antibiotikaverbrauch und Bevölkerungsdichte, berücksichtigt wurden. Bei *K. pneumoniae* wurde ein noch höherer Anstieg festgestellt: 0,9 % pro Jahr für 3.-Generations-Cephalosporin-resistente *K. pneumoniae* und 1,2 % für Fluorchinolon-resistente *K. pneumoniae*. McGough et al. [14] kamen zu dem Schluss, dass die Umgebungstemperatur die Zunahme von Antibiotikaresistenz erheblich beeinflussen

kann. In einem weiteren Review schlussfolgern Forrester et al. [15], dass der Temperaturanstieg aufgrund des Klimawandels eine Zunahme der Resistenz bei pathogenen Bakterien bewirken kann.

3.2 Zusammenhang zwischen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsanstieg und dem Wachstum und der Verbreitung von bakteriellen Krankheitserregern

Die optimale Wachstumstemperatur für viele relevante Bakterien liegt bei mehr als 30 °C [8], so dass eine verstärkte Bakterienvermehrung mit steigenden Temperaturen

Temperaturerhöhungen und Veränderungen der Luftfeuchtigkeit und des Niederschlags können zu einer verstärkten Ausbreitung von AMR und nosokomialen Infektionen führen.

wahrscheinlich ist. In ihrer Übersichtsarbeit stellen Forrester et al. [15] fest, dass höhere Temperaturen und höhere Luftfeuchtigkeit das Besiedlungs- sowie Infektionsrisiko für MRSA erhöhen. Es wurde auch berichtet, dass sich die Jahreszeit auf die Besiedlung oder Infektion mit *Clostridioides difficile* auswirkt, wobei es Unterschiede zwischen der südlichen und nördlichen Hemisphäre gibt. Obwohl sie keine Studien fanden, die einen Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Saisonalität und Carbapenem-resistenten Enterobacterales (CRE) belegen, folgerten sie aus der indirekten Evidenz, dass ein solcher Zusammenhang ebenfalls plausibel sein könnte [15]. Surveillancestudien von Aghdassi et al. [16, 18] und Schwab et al. [17] deuten darauf hin, dass Veränderungen in der Zusammensetzung des Mikrobioms möglicherweise durch Temperaturanstiege modifiziert werden könnten. Das Wachstum und die Ausbreitung von bakteriellen Krankheitserregern könnte also durch höhere Temperaturen begünstigt werden. Die Mechanismen, die der Hypothese zugrunde liegen, dass höhere Temperaturen zu einer stärkeren bakteriellen Vermehrung führen, sind noch nicht vollständig geklärt.

3.3 Zusammenhang zwischen erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit und nosokomialen Infektionen

Es gibt auch Hinweise darauf, dass die Zahl der HAIs mit steigender Temperatur zunimmt. Dies ist von Bedeutung, da 75% der AMR-Krankheitslast auf HAIs zurückzuführen sind, diese wiederum führen zu einem höheren Antibiotikaeinsatz [6]. Postoperative Wundinfektionen (surgical site infections, SSIs) gehören mit schätzungsweise 800.000 Fällen pro Jahr in der EU zu den häufigsten HAIs. Die am

häufigsten gefundenen Erreger bei SSIs sind *S. aureus*, *Enterococcus* spp. und *E. coli* [18]. Aghdassi et al. [16] zeigten insbesondere, dass SSIs nach Operationen in wärmeren Monaten ($\geq 20^\circ\text{C}$) häufiger auftreten als in Monaten mit kälteren Temperaturen ($< 5^\circ\text{C}$) (Adjustierte Odds Ratio (AOR): 1,13; 95%-Konfidenzintervall (KI): 1,06–1,20). SSIs nahmen zu, wenn die Temperatur im Monat der Operation über 20°C stieg, und zwar sowohl bei gramnegativen als auch bei grampositiven Erregern. Bei Betrachtung der Temperatur als kontinuierliche Variable zeigten die Daten, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von SSIs um 1% pro 1°C Temperaturanstieg zunimmt. Stärkere Assoziationen zwischen wärmeren Temperaturen und einem Anstieg der SSIs finden sich bei gramnegativen Erregern. Darüber hinaus schienen oberflächliche SSIs einen stärkeren Zusammenhang mit der Temperatur zu haben als tiefe SSIs. Oberflächliche SSIs mit gramnegativen Erregern traten bei Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ um 38% häufiger auf als in Monaten mit Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$ [16]. In einer zweiten Studie fanden Aghdassi et al. [18] ein um 6% erhöhtes Risiko für SSIs mit *Acinetobacter baumannii* pro 1°C Anstieg und ein 4% erhöhtes Risiko für SSIs mit *Enterobacter* spp. in Deutschland. Es wurde kein Zusammenhang zwischen dem Risiko von SSIs mit *Streptococcus* spp. oder *Candida albicans* und einem Temperaturanstieg festgestellt.

Eine weitere Studie von Schwab et al. [17] berichtete über nosokomiale Blutstrominfektionen (healthcare-associated blood stream infections, ha-BSIs) auf Intensivstationen und stellte einen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der mittleren Tagestemperatur und ha-BSIs fest. In Monaten mit Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ war die Inzidenzrate von ha-BSIs um 17% höher als in Monaten mit Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$. Der

Temperatureffekt ist bei ha-BSIs mit gramnegativen Erregern am stärksten ausgeprägt (38% Anstieg der Inzidenzrate), gefolgt von ha-BSIs mit grampositiven Erregern (13% Anstieg der Inzidenzrate). Die einzige Ausnahme bildete *Streptococcus pneumoniae* mit einem reduzierten Inzidenzratenverhältnis (incidence rate ratio, IRR) von 0,498 (95%-KI: 0,174–1,429) für Temperaturen $\geq 20^\circ\text{C}$ im Vergleich zu Temperaturen $< 5^\circ\text{C}$. Dies lässt sich möglicherweise durch den Übertragungsweg über Tröpfchen erklären, der relevanter ist, wenn sich die Bevölkerung während der kälteren Jahreszeiten überwiegend in geschlossenen Räumen aufhält. Neben der Temperatur korrelierte auch die relative Luftfeuchtigkeit umgekehrt mit einem Anstieg der ha-BSIs [17].

3.4 Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und Antibiotikaverbrauch

In der europäischen Surveillancestudie präsentierten McGough et al. [14] Daten, die darauf hinweisen, dass in Ländern mit höheren Durchschnittstemperaturen ein höherer Antibiotikaverbrauch zu verzeichnen ist. Für Deutschland vermuten Aghdassi et al. [18], dass bei steigenden Temperaturen mit einer Zunahme von HAIs zu rechnen ist und dass diese steigenden Infektionsraten dann möglicherweise zu einem erhöhten Antibiotikaeinsatz führen.

3.5 Zusammenfassung der klimatischen Risiken, die die AMR-Krankheitslast in Europa beeinflussen könnten

In einer kürzlich durchgeführten Studie über die Auswirkungen des Klimawandels auf Krankheiten sammelten

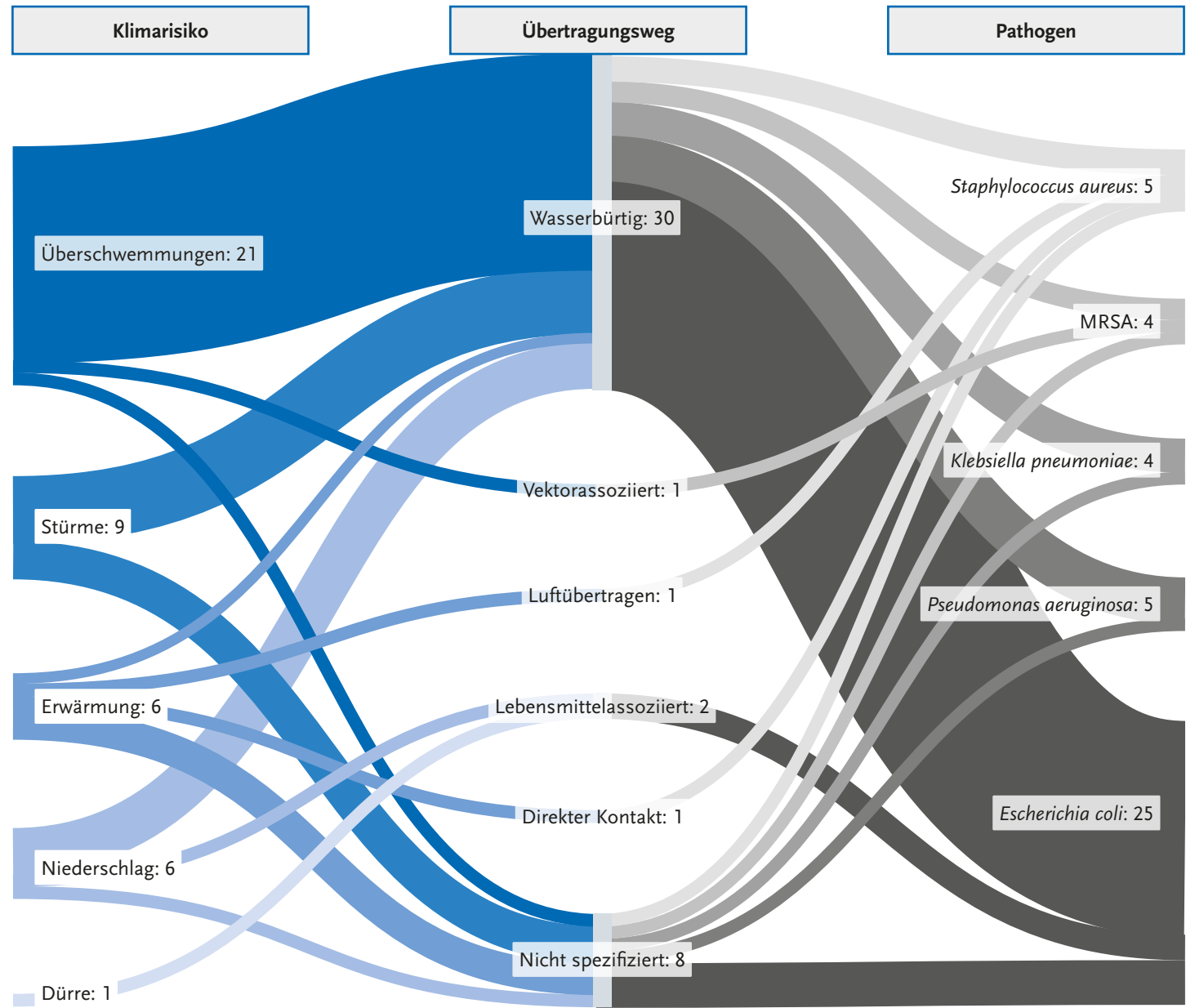
Mora et al. [12] Daten über die Übertragungswege, durch die klimatische Risiken zu einer Verschärfung bestimmter Krankheiten führen. Sie identifizierten weltweit 43 Artikel, in denen der Klimawandel mit Daten zu Krankheitserregern, die laut Cassini et al. [4] die höchste AMR-Belastung in Europa verursachen, in Verbindung gebracht werden. Die Ergebnisse dieser Studien lassen sich in einem Sankey-Diagramm potenzieller Pfade veranschaulichen, über die klimatische Risiken diese Erreger verschlimmern könnten (Abbildung 2). Zu den häufigsten Erregern, bei denen ein Zusammenhang mit klimatischen Risiken festgestellt wurde, gehörten *E. coli* (25 Veröffentlichungen), gefolgt von *S. aureus* (neun Veröffentlichungen, vier Veröffentlichungen speziell für MRSA), *P. aeruginosa* (fünf Veröffentlichungen) und *K. pneumoniae* (vier Veröffentlichungen). Die mit diesen Erregern verbundenen klimatischen Risiken waren Überschwemmungen, Stürme, Erwärmung, Niederschlag und Dürren. Die Hauptübertragungswege waren die Übertragung durch Wasser sowie nicht näher spezifizierte Übertragungswege.

4. Diskussion

4.1 Klimawandel und AMR

Der Klimawandel wird durch Temperaturerhöhungen, Veränderungen der Luftfeuchtigkeit und des Niederschlags wahrscheinlich zu einer Ausbreitung bakterieller Krankheitserreger, einem verstärkten Einsatz von Antibiotika und einer Zunahme von AMR in Europa führen. Aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen und der Bedeutung verschiedener Einflussfaktoren ist die vorliegende Übersichtsarbeit jedoch nicht in der Lage, die gesamte Dimension

Abbildung 2
 Zusammenfassung der klimatischen Risiken, die die Ausbreitung und Krankheitslastentwicklung von resistenten Krankheitserregern beeinflussen können. Eine vollständige interaktive Darstellung aller Pfade und die zugrunde liegenden Daten sind verfügbar [20].
 Quelle: Webtool von Mora et al. [12, 20]



MRSA=Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus*

Der Klimawandel, der zu häufigeren und extremen Wetterereignissen beiträgt, wird wahrscheinlich zu einem verstärkten Einsatz antimikrobieller Arzneimittel bei Menschen und Tieren führen.

dieser Zusammenhänge abzubilden. Für Europa liegen nur wenige Daten vor, und es konnten nur sechs Studien identifiziert werden, welche die Einschlusskriterien erfüllten. Alle diese sechs Studien deuten jedoch darauf hin, dass die allgemein zunehmende Krankheitslast durch AMR aufgrund des Klimawandels weiter beschleunigt werden könnte.

Es gibt einige Belege für die Zunahme von AMR bei steigenden Temperaturen in Europa [13, 14]. Studien außerhalb Europas bestätigen diese Ergebnisse. Eine US-amerikanische Studie von MacFadden et al. [10] ergab, dass ein Anstieg der lokalen Mindesttemperatur mit einem Anstieg der Antibiotikaresistenzraten verbunden ist. Dies gilt jedoch nicht für alle Erreger im selben Maße und weitere Einflussfaktoren wie Hygienemaßnahmen sind zu berücksichtigen. EARS-Net Daten zeigen beispielsweise einen seit Jahren anhaltende Rückgang der MRSA-Inzidenz in Europa [14]. Hansen et al. [21] stellten fest, dass Länder mit sinkenden MRSA-Anteilen eine besonders strikte Umsetzung verschiedenster Präventionsmaßnahmen aufweisen. In diesem Review berücksichtigte Studien beobachteten ebenfalls einen Anstieg der HAIs mit einem Anstieg der Temperatur. SSIs und ha-BSIs in Deutschland, meist durch gramnegative Bakterien verursacht, traten häufiger bei wärmeren Temperaturen ($\geq 20^\circ\text{C}$) auf. In Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen kam eine japanische Studie von Kobayashi et al. [22] zu dem Schluss, dass SSIs mit den Sommermonaten assoziiert sind (Juli – September, Hazard Ratio: 1,53; 95 %-KI: 1,06–3,83). Außerdem waren die SSI-Raten in den Sommermonaten höher als in den Nicht-Sommermonaten (3,9 % vs. 1,9 %; $p < 0,05$). Eine andere Studie aus Japan kam wiederum zu gegensätzlichen Ergebnissen: Sagara et al. [23] stellten fest, dass Au-

geninfektionen in den Wintermonaten am häufigsten und in den Sommer- und Herbstmonaten seltener vorkamen. Als sie die Ergebnisse jedoch nach Erregern stratifizierten, beobachteten sie, dass durch *S. aureus* verursachte Infektionen im Sommer und Herbst häufiger auftraten als in den kälteren Jahreszeiten. Infektionen mit *Streptococcus* spp. traten häufiger in den Frühlings- und Sommermonaten auf. In einer anderen Surveillancestudie, die sich auf AMR-Gene und deren Verteilung auf globaler Ebene unter Berücksichtigung klimatischer Faktoren konzentrierte, wurde eine ungleichmäßige Verteilung von AMR-Genen in Bakterien in mehreren Städten weltweit festgestellt, was auf einen Zusammenhang mit höheren Temperaturen in verschiedenen Regionen schließen lässt [24]. Um die Zusammenhänge zwischen klimatischen Faktoren und Antibiotikaresistenzen vollständig zu verstehen, sind weitere Forschungserkenntnisse erforderlich, aber die vorhandenen Daten reichen aus, um zu zeigen, dass der Klimawandel einen Einfluss auf Antibiotikaresistenzen hat und beide ohne geeignete Präventionsmaßnahmen weiter zunehmen werden.

Klimarisiken können Menschen und pathogene Erreger näher zusammenbringen, was zu einem Anstieg der Übertragung von Krankheitserregern und Infektionen führt, wie im illustrierten Modell (Abbildung 2) mit Daten von Mora et al. gezeigt wird [12]. Eine Zunahme von extremen Wetterereignissen und Naturkatastrophen kann Beeinträchtigungen und Verhältnisse verursachen, die zu einer Zunahme von AMR und der Ausbreitung von Krankheitserregern sowie zu einem Anstieg des damit verbundenen Antibiotikaverbrauchs führen. Solche Ereignisse können auch zu Flucht und Vertreibung und damit zu einer erhöhten Be-

Der übermäßige Einsatz von antimikrobiellen Arzneimitteln bei Menschen, Tieren und in der Umwelt verschärft die Herausforderungen durch AMR.

lastung der Gesundheitssysteme führen, was die Ausbreitung von AMR und HAIs weiter verschärfen kann [25].

Die vorliegende Literaturübersicht hat sich auf die bakteriellen AMR-Erreger konzentriert, die derzeit die größte Belastung in Europa verursachen. Neben der Belastung durch Infektionen mit antibiotikaresistenten Bakterien kann der Klimawandel jedoch auch die Ausbreitung anderer resistenter Erreger begünstigen, wie z. B. die Resistenz gegen Malariamedikamente oder antiretrovirale Therapien [26]. Darüber hinaus könnte die Klimakrise das Auftreten und die Ausbreitung neuer und wiederkehrender Erreger ermöglichen. So wurde beispielsweise vermutet, dass *Candida auris*, ein in der Umwelt vorkommender, häufig multiresistenter Pilz, durch den Klimawandel zunehmend pathogener werden könnte [27]. Darüber hinaus weisen neuere Studien auf eine potenzielle Bedrohung der Gesundheit durch die Freisetzung von Bakterien und Viren aus dem auftauenden Permafrostboden infolge des Klimawandels hin [28, 29].

4.2 One Health und AMR

Die Besiedlung und die Infektion des Menschen mit Krankheitserregern können durch Expositionen in verschiedenen Bereichen der Gesellschaft und des Gesundheitssystems entstehen. Ferner können diese durch sozioökonomische und umweltbedingte Gesundheitsdeterminanten beeinflusst werden. Da sich dieser Beitrag auf die menschliche Gesundheit konzentriert, wurden Veränderungen bei der Antibiotikaresistenz nicht umfassend aus einer One-Health-Perspektive bewertet. Gleichwohl wird dieser Aspekt teils durch die Berücksichtigung des Reviews von Forrester et al. [15] hervorgehoben, welches die One-Health-Perspek-

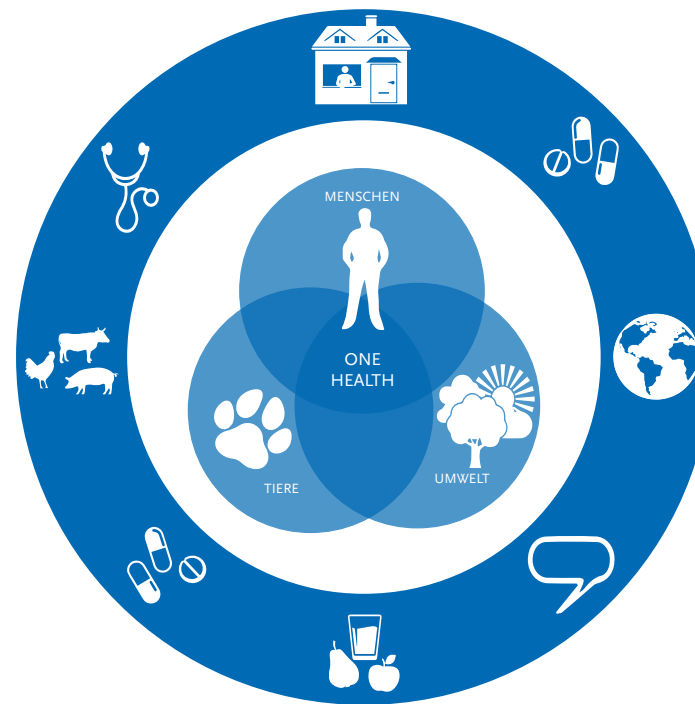
tive einschließt. AMR nimmt bei Menschen, Tieren, Pflanzen und in der Umwelt zu [30], und dieser Anstieg kann durch den globalen und lokalen Temperaturanstieg infolge des Klimawandels beeinflusst werden. One-Health-Faktoren, also menschliche und tierische Populationen sowie die Umwelt, und die Wechselwirkungen zwischen ihnen stehen im Zusammenhang mit Infektionskrankheiten und Antibiotikaresistenzen (Abbildung 3). Solche Wechselwirkungen können oft nur retrospektiv analysiert werden, und ihr Ausmaß wird in einigen Studien wahrscheinlich unterschätzt. Da die derzeitigen Anzeichen darauf hindeuten, dass sich die bestehende AMR-Pandemie aufgrund des Klimawandels verschlimmert, sind bessere Daten sowie Maßnahmen des öffentlichen Gesundheitswesens im Bereich der Gesundheit von Mensch-Tier-Umwelt erforderlich.

4.3 Limitationen dieses Reviews

Mögliche Limitationen der vorliegenden Analyse hängen mit der begrenzten Anzahl von Studien zusammen, die in diesen Review einbezogen wurden. Unter den ausgeschlossenen 35 außereuropäischen Studien gibt es möglicherweise zusätzliche relevante Belege für ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen Klimawandel und AMR.

Bei den eingeschlossenen Studien handelte es sich überwiegend um Beobachtungsstudien, bei denen Surveillance-daten zu Krankheitserregern oder Infektionen mit Klimadaten in Form eines ökologischen Studiendesigns kombiniert wurden. Messfehler bei Exposition, Ergebnis und Assoziation können zu einer Verzerrung und Ungenauigkeit der berichteten Schätzungen führt. Auch wenn in den einzelnen Studien diverse Störfaktoren berücksichtigt wurden,

Abbildung 3
One-Health-Faktoren und Wechselwirkungen
im Zusammenhang mit Infektionskrankheiten
und Antibiotikaresistenz.
Menschen, Tiere und Umwelt (Mitte)
beeinflussen AMR durch den Einsatz von
Medikamenten bei Mensch und Tier,
Ernährung, Viehbestand, Kommunikation,
Gesundheitspersonal und -einrichtungen
(äußerer Kreis).
 Illustration: Robert Koch-Institut



kann es zusätzliche Faktoren geben, die den Zusammenhang zwischen Klima und AMR oder HAIs beeinflussen. Durch die Fokussierung auf die EU/EWR-Länder in dieser Übersichtsarbeit wurden gesellschaftliche und wirtschaftliche Störfaktoren möglicherweise reduziert. Dennoch wurde die potenzielle Relevanz solcher Faktoren für AMR bereits nachgewiesen und sollte im Auge behalten werden.

Die beiden Veröffentlichungen von Aghdassi et al. [16, 18], die in unsere Übersichtsarbeit einbezogen wurden, sollten gemeinsam betrachtet werden, da sie denselben Datensatz verwenden. Diese Studien sowie die von Schwab et al. [17] wurden einbezogen, da davon auszugehen ist, dass eine Zunahme von HAIs zu einer steigenden AMR-Krankheits-

last führt und somit als indirekte Evidenz betrachtet werden muss.

5. Schlussfolgerung und Empfehlungen

Die Zusammenhänge zwischen Antibiotikaresistenz und Klimawandel bedürfen deutlich mehr Aufmerksamkeit. Weitere detaillierte Studien mit lokalen Daten zu Wetterbedingungen, Resistenzsituation, Infektionskrankheiten, aber auch Antibiotikaeinsatz, sozialen Determinanten und anderen infektiösen und sozialen Faktoren sind erforderlich, um die Zusammenhänge und ihre Auswirkungen besser zu verstehen. Für die Durchführung solcher Studien sollten finanzielle und wissenschaftliche Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. Das Beispiel zum Rückgang der MRSA-Inzidenz in vielen EU-Ländern aufgrund gezielter präventiver Maßnahmen, insbesondere Maßnahmen zur Infektionsprävention und -kontrolle in Krankenhäusern, zeigt, dass antibiotikaresistente Erreger kontrolliert werden können. Doch der Klimawandel wird die Bekämpfung von AMR wahrscheinlich noch schwieriger gestalten. Andererseits kann es zu Synergieeffekten (bzw. Co-Benefits) kommen, wenn Maßnahmen sowohl gegen AMR als auch gegen den Klimawandel ergriffen werden, z. B. durch eine Reduzierung der industriellen Viehzucht oder der Fleischproduktion und des Fleischkonsums. Obwohl sich die vorliegende Zusammenfassung an Evidenz auf Erkenntnisse in Europa konzentriert, ist AMR eine pandemische Bedrohung. Die AMR-Krankheitslast ist im globalen Süden höher. Folglich werden die Prävention und Kontrolle von AMR mit Maßnahmen in einem einzelnen Land nur begrenzt erfolgreich sein und erfordern eine globale Anstrengung.

Es sind mehr Finanzmittel, politisches Engagement und koordinierte globale Maßnahmen erforderlich, um besser auf die Bedrohungen durch AMR und die Klimakrise reagieren zu können

Trotz der Komplexität der Prozesse des Klimawandels und der Antibiotikaresistenz wird es wichtig sein, die Veränderungen der Antibiotikaresistenz im Laufe der Zeit genau zu beobachten, um die Prioritäten für Maßnahmen im Bereich der öffentlichen Gesundheit festzulegen. Es werden verstärkte Ansätze zur One-Health-Surveillance erforderlich sein. Globale Surveillance-Systeme, wie das europäische EARS-Net und das weltweite Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS), sind besonders wichtig für Ländervergleiche und könnten ökologische Studien ermöglichen, die Zusammenhänge mit regionalen Klimaveränderungen analysieren. Auf globaler Ebene müssen die Verfügbarkeit und Standardisierung antimikrobieller Empfindlichkeitstests (antimicrobial susceptibility testing, AST) weiter verbessert werden, insbesondere im globalen Süden, um repräsentativere AMR-Surveillance-Daten zu erhalten. Darüber hinaus müssen Studien zur Krankheitslast durch AMR entwickelt und routinemäßig aktualisiert werden, um rechtzeitige Entscheidungen im Bereich der öffentlichen Gesundheit zu ermöglichen.

Neben einer verbesserten One-Health-AMR-Surveillance sind eine flächendeckende Gesundheitsversorgung und wirksame Maßnahmen zur Infektionsprävention und -kontrolle, einschließlich eines verlässlichen Zugangs zu Wasser, sanitären Einrichtungen und Hygiene, sowie ein sachgerechter und verantwortungsvoller Einsatz von antimikrobiellen Substanzen (Antimicrobial Stewardship) im One-Health-Bereich erforderlich, um die AMR-Pandemie weltweit einzudämmen. Es sind Investitionen in die Forschung und Entwicklung neuer antimikrobieller Arzneimittel sowie in die Entwicklung entsprechender Impfstoffe nötig.

Korrespondenzadresse

Dr. med. Sebastian Haller
Robert Koch-Institut
Abteilung für Infektionsepidemiologie
Seestr. 10
13353 Berlin
E-Mail: HallerS@rki.de

Zitierweise

Meinen A, Tomczyk S, Wiegand FN, Abu Sin M, Eckmanns T et al. (2023) Antibiotikaresistenz in Deutschland und Europa – Ein systematischer Review zur zunehmenden Bedrohung, beschleunigt durch den Klimawandel. *J Health Monit* 8(S3):102–119. DOI 10.25646/11395

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

Das RKI-Koordinationssteam 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 Maïke Voss für die beratende Tätigkeit in der projektbegleitenden Fachgruppe.

Literatur

1. EclinicalMedicine (2021) Antimicrobial resistance: A top ten global public health threat. *EclinicalMedicine* 41:101221
2. World Health Organization (2019) Ten threats to global health in 2019. <https://www.who.int/news-room/spotlight/ten-threats-to-global-health-in-2019> (Stand: 18.01.2023)
3. Murray CJL, Ikuta KS, Sharara F et al. (2022) Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: A systematic analysis. *Lancet* 399(10325):629–655
4. Cassini A, Högberg LD, Plachouras D et al. (2019) Attributable deaths and disability-adjusted life-years caused by infections with antibiotic-resistant bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: A population-level modelling analysis. *Lancet Infect Dis* 19(1):56–66
5. European Antimicrobial Resistance Collaborators (2022) The burden of bacterial antimicrobial resistance in the WHO European region in 2019: A cross-country systematic analysis. *Lancet Public Health* 7(11):e897–e913
6. European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC), Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2019) Antimicrobial resistance – Tackling the burden in the European Union. ECDC, OECD. <https://www.oecd.org/health/health-systems/AMR-Tackling-the-Burden-in-the-EU-OECD-ECDC-Briefing-Note-2019.pdf> (Stand: 18.01.2023)
7. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Centers for Environmental Information (2022) Monthly global climate report for annual 2021. NOAA. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113> (Stand: 18.01.2023)
8. Ratkowsky DA, Olley J, McMeekin TA et al. (1982) Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *J Bacteriol* 149(1):1–5
9. Hashimoto M, Hasegawa H, Maeda S (2019) High temperatures promote cell-to-cell plasmid transformation in *Escherichia coli*. *Biochem Biophys Res Commun* 515(1):196–200
10. MacFadden D, McGough S, Fisman D et al. (2018) Antibiotic resistance increases with local temperature. *Nat Clim Chang* 8:510–514
11. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372:n71
12. Mora C, McKenzie T, Gaw IM et al. (2022) Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nat Clim Chang* 12(9):869–875
13. Kaba HEJ, Kuhlmann E, Scheithauer S (2020) Thinking outside the box: Association of antimicrobial resistance with climate warming in Europe – A 30 country observational study. *Int J Hyg Environ Health* 223(1):151–158
14. McGough SF, MacFadden DR, Hattab MW et al. (2020) Rates of increase of antibiotic resistance and ambient temperature in Europe: A cross-national analysis of 28 countries between 2000 and 2016. *Euro Surveill* 25(45):1900414
15. Forrester JD, Cao S, Schaps D et al. (2022) Influence of socio-economic and environmental determinants of health on human infection and colonization with antibiotic-resistant and antibiotic-associated pathogens: A scoping review. *Surg Infect (Larchmt)* 23(3):209–225
16. Aghdassi SJS, Schwab F, Hoffmann P et al. (2019) The association of climatic factors with rates of surgical site infections: 17 years' data from hospital infection surveillance. *Dtsch Arztebl Int* 116(31–32):529–536
17. Schwab F, Gastmeier P, Hoffmann P et al. (2020) Summer, sun and sepsis – The influence of outside temperature on nosocomial bloodstream infections: A cohort study and review of the literature. *PLoS One* 15(6):e0234656
18. Aghdassi SJS, Gastmeier P, Hoffmann P et al. (2021) Increase in surgical site infections caused by gram-negative bacteria in warmer temperatures: Results from a retrospective observational study. *Infect Control Hosp Epidemiol* 42(4):417–424
19. Kramer TS, Schröder C, Behnke M et al. (2019) Decrease of methicillin resistance in *Staphylococcus aureus* in nosocomial infections in Germany – A prospective analysis over 10 years. *J Infect* 78(3):215–219
20. Camilo Mora (2022) Traceable evidence of the impacts of climate change on pathogenic human diseases <https://camilo-mora.github.io/Diseases/> (Stand: 18.01.2023)
21. Hansen S, Schwab F, Asensio A et al. (2010) Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in Europe: Which infection control measures are taken? *Infection* 38(3):159–164

22. Kobayashi K, Ando K, Kato F et al. (2021) Seasonal variation in incidence and causal organism of surgical site infection after PLIF/TLIF surgery: A multicenter study. *J Orthop Sci* 26(4):555–559
23. Sagara H, Yamamoto T, Sekiryu T et al. (2016) Seasonal variation in the incidence of late-onset bleb-related infection after filtering surgery in Japan: The Japan Glaucoma Society survey of bleb-related infection report 3. *J Glaucoma* 25(1):8–13
24. Danko D, Bezdán D, Afshin EE et al. (2021) A global metagenomic map of urban microbiomes and antimicrobial resistance. *Cell* 184(13):3376–3393.e17
25. Global Leaders Group on Antimicrobial Resistance (2021) Antimicrobial resistance and the climate crisis. <https://www.amrleaders.org/resources/m/item/antimicrobial-resistance-and-the-climate-crisis> (Stand: 18.01.2023)
26. Fernando SD (2020) Climate change and malaria – A complex relationship. *United Nations Chronicle*. <https://www.un.org/en/chronicle/article/climate-change-and-malaria-complex-relationship> (Stand: 06.02.2023)
27. Casadevall A, Kontoyiannis DP, Robert V (2021) Environmental *Candida auris* and the global warming emergence hypothesis. *mBio* 12(2):e00360–00321
28. Kim H, Kim M, Kim S et al. (2022) Characterization of antimicrobial resistance genes and virulence factor genes in an Arctic permafrost region revealed by metagenomics. *Environ Pollut* 294:118634
29. Alempic JM, Lartigue A, Goncharov AE et al. (2023) An update on eukaryotic viruses revived from ancient permafrost. *Viruses* 15(2):564
30. OECD, ECDC, European Food Safety Authority (EFSA), European Medicines Agency (EMA) (2022) Antimicrobial resistance in the EU/EEA: A One Health response. OECD, ECDC, EFSA, EMA. <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/antimicrobial-resistance-policy-brief-2022.pdf> (Stand: 18.01.2023)

Annex Tabelle 1
Angewandter Suchstring

Datenbank	Suchstrategie
PubMed	("climate change"[MeSH Terms] OR "global warming"[MeSH terms] OR "climatic processes"[MeSH terms] OR ("climate*" [Title/Abstract] AND "change*" [Title/Abstract]) OR "climate*" [Title/Abstract] OR "temperature*" [Title/Abstract]) AND ("Anti-Bacterial Agents"[MeSH Terms] OR "Drug Resistance, Bacterial*" [MeSH Terms] OR "health care associated infection" [Title/Abstract] OR "nosocomial" [Title/Abstract] OR "AMR" [Title/Abstract] OR "antimicrobial resistance*" [Title/Abstract] OR "antimicrobial resistanc*" [Title/Abstract] OR "antibiotic*" [Title/Abstract]) AND ((y_10[Filter]) AND (humans[Filter]))

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 und Redakteure

Dr. Martina Groth, Johanna Gutsche, Dr. Birte Hintzpeter,
Dr. Kirsten Kelleher, Dr. Franziska Prütz, Dr. Alexander Rommel,
Dr. Livia Ryl, Dr. Anke-Christine Saß, Stefanie Seeling, Simone Stimm

Satz

WEBERSUPIRAN.berlin

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**