

UMWELT UND GESUNDHEIT

04/2021

Abschlussbericht

Einfluss des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen

von:

Irmela Schlegel, Dr. Stefan Muthers,
Prof. Dr. Andreas Matzarakis
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung,
Deutscher Wetterdienst, Freiburg im Breisgau

Herausgeber:

Umweltbundesamt

UMWELT UND GESUNDHEIT 04/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 214 0

FB000608

Abschlussbericht

Einfluss des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen

von

Irmela Schlegel, Dr. Stefan Muthers,
Prof. Dr. Andreas Matzarakis
Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung,
Deutscher Wetterdienst, Freiburg im Breisgau

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Zentrum für Medizin-Meteorologische Forschung, Deutscher Wetterdienst
Stefan-Meier-Straße 4-6
79104 Freiburg im Breisgau

Abschlussdatum:

Juli 2021

Redaktion:

Fachgebiet II 1.5, Umweltmedizin, gesundheitliche Bewertung
Dr. Hans-Guido Mücke

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1868-4340

Dessau-Roßlau, Oktober 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Einfluss des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen

Es existieren zahlreiche Belege für den Einfluss des Wetters auf Atemwegserkrankungen, insbesondere die Wirkung der thermischen Umgebung ist empirisch nachweisbar. Zahlreiche Studien belegen auch den Einfluss des Wetters auf kardiovaskuläre Erkrankungen und verschiedene psychische Störungen. Folgend auf einer systematischen Literaturrecherche wurde mittels einer retrospektiven Analyse die Zusammenhänge zwischen Mortalität und Morbidität dieser Krankheitsbilder und Wetterfaktoren für die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland untersucht. Das Mortalitätsrisiko sowohl von Atemwegserkrankungen als auch von ischämischen Herzerkrankungen steigt oberhalb von ca. 18 °C Tagesmittellufttemperatur stark an und erreicht eine Zunahme der Mortalität um bis zu 40 % an sehr heißen Tagen. Die Mortalität aufgrund von chronischen Atemwegserkrankungen ist durch einen steileren Anstieg stärker betroffen. Die Abschätzung des Klimawandels und seiner Folgen erfolgt mittels Ensembledaten für den Zeitraum 1981 – 2100 bestehend aus regionalen Klimasimulationen, welche die Entwicklungen des zukünftigen Klimas auf Basis zwei verschiedener Emissionsszenarien abbilden. Für die Temperatur-Assoziierte Mortalität wird ein hitzebedingter Anstieg bis Ende des Jahrhunderts erwartet, welcher von einem Rückgang kalter Tage nicht ausgeglichen werden kann. Die Anzahl der Tage in Bezug zu einer Hitzeperiode¹ wird für Deutschland von aktuell 13 Tagen (1981 – 2010) bis 2021 – 2050 auf ca. 23 Tage, am Ende des Jahrhunderts sogar auf 31 bis 54 Tage steigen. Zusätzlich zur Häufigkeit zeigen sowohl die Dauer als auch die Intensität der Hitzeperioden eine signifikante Zunahme. Die Mortalität während Hitzeperioden steigt vor allem in Abhängigkeit mit ihrer Dauer und verstärkt die zu erwartende Mortalitätszunahme. Die erzielten Ergebnisse betonen den Bedarf geeigneter gesundheitlicher Präventionsmaßnahmen und eine deutliche Verstärkung von Klimaschutzmaßnahmen, um die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderungen so gering wie möglich zu halten.

Abstract: Impact of climate change on morbidity and mortality due to respiratory diseases.

By now, abundant evidence of the influence of weather on respiratory diseases exists; in particular, the effect of the thermal environment has been empirically demonstrated. Numerous studies also demonstrate the influence of weather on cardiovascular diseases and various mental disorders. Following a systematic literature review, a retrospective analysis was conducted to empirically investigate the associations between mortality and morbidity of these diseases and weather factors for the years 2001 – 2015 in Germany. The mortality risk of both respiratory diseases and ischemic heart disease increases sharply above about 18 °C daily mean air temperature and reaches an increase in mortality of up to 40% on very hot days. Mortality due to chronic respiratory diseases is more affected with a steeper increase. The estimation of climate change and its consequences is carried out with ensemble data for the period 1981 – 2100 consisting of regional climate simulations, which represent the developments of the future climate on the basis of two emission scenarios. For the temperature-associated mortality, a heat-related increase is expected until the end of the century, which cannot be compensated by a decrease in cold conditions. The number of days in context of heat periods² for Germany is expected to increase from currently 13 days (1981 – 2010) to about 23 days by 2021 – 2050, and even to 31 to 54 days by the end of the century. In addition to the frequency, both the duration and the intensity of heat waves show a significant increase. Mortality during heat waves increases mainly as a

¹ Definition Hitzewelle: Mindestens drei aufeinanderfolgende Tage mit $T_a >$ langjährigen 95. Perzentil.

² Heat wave definition: Minimum of three consecutive days with $T_a >$ longterm 95. Percentile.

function of their duration, amplifying the expected mortality increase. The obtained results emphasize the need for appropriate preventive health measures and a significant strengthening of climate change mitigation measures to minimize the impact of the expected climate changes.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis..... | 10 |
| Tabellenverzeichnis..... | 15 |
| Abbildungsverzeichnis Anhang..... | 19 |
| Tabellenverzeichnis Anhang..... | 20 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 22 |
| Zusammenfassung..... | 23 |
| Summary..... | 28 |
| 1 Einleitung..... | 33 |
| 1.1 Vorläuferstudie zu ischämischen Herzerkrankungen..... | 33 |
| 1.2 Motivation..... | 34 |
| 1.3 Zielsetzung..... | 37 |
| 1.4 Aufbau des Berichts..... | 38 |
| 2 Stand der Wissenschaft..... | 40 |
| 2.1 Literaturrecherche..... | 40 |
| 2.2 Zusammenhang zwischen Wetter und Atemwegserkrankungen..... | 42 |
| 2.2.1 Saisonale Schwankungen..... | 42 |
| 2.2.2 Temperatureffekte..... | 44 |
| 2.2.3 Luftfeuchte und Niederschlag..... | 52 |
| 2.2.4 Luftdruck..... | 55 |
| 2.2.5 Strahlung..... | 55 |
| 2.2.6 Wind..... | 56 |
| 2.2.7 Luftschadstoffe..... | 56 |
| 2.2.8 Luftgetragene Allergene..... | 58 |
| 2.3 Zusammenhang zwischen Wetter und psychischen Störungen..... | 59 |
| 2.3.1 Saisonale Schwankungen..... | 59 |
| 2.3.2 Effekte der Sonnenscheindauer und Strahlung..... | 61 |
| 2.3.3 Temperatureffekte..... | 64 |
| 2.3.4 Andere Wettereinflüsse..... | 67 |
| 2.3.5 Effekt von Luftbeimengungen..... | 68 |
| 2.4 Zusammenhang zwischen Wetter und ischämischen Herzerkrankungen..... | 69 |
| 2.4.1 Zusammenfassung der Vorläuferstudie..... | 69 |
| 2.4.2 Neue Erkenntnisse..... | 71 |
| 3 Datengrundlage..... | 73 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.1 | Morbiditäts- und Mortalitätsdaten..... | 73 |
| 3.2 | Meteorologische Daten | 77 |
| 3.3 | Pollendaten | 77 |
| 3.4 | Klimaszenarien | 78 |
| 3.4.1 | Regionale Klimamodelle | 78 |
| 3.4.2 | Referenzdatensatz HYRAS..... | 79 |
| 4 | Methoden..... | 80 |
| 4.1 | Bestimmung des Erwartungswertes | 80 |
| 4.2 | Relatives Risiko..... | 82 |
| 4.3 | Zusammenhang zwischen thermischer Umwelt und Mortalität bzw. Morbidität | 83 |
| 4.4 | Temperatur-Assoziierte-Mortalität..... | 83 |
| 4.5 | Hitzeperioden..... | 85 |
| 4.6 | Pollenanalyse | 86 |
| 4.6.1 | Kontingenztafel | 86 |
| 4.6.2 | Grenzwertbestimmung Pollenkonzentration | 87 |
| 4.6.3 | Pollensaisonbestimmung..... | 88 |
| 4.6.4 | Grenzwertbestimmung Asthmafälle während Pollenbelastung..... | 88 |
| 5 | Ergebnisse | 89 |
| 5.1 | Gesamteffekt der Temperatur | 89 |
| 5.1.1 | Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen..... | 89 |
| 5.1.1.1 | Retrospektive Analyse | 89 |
| 5.1.1.2 | Auswirkungen des Klimawandels | 92 |
| 5.1.2 | Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (IHK)..... | 96 |
| 5.1.2.1 | Retrospektive Analyse | 96 |
| 5.1.2.2 | Auswirkungen des Klimawandels | 99 |
| 5.1.3 | Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen..... | 101 |
| 5.1.4 | Morbidität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen..... | 104 |
| 5.1.5 | Mortalität durch Suizid | 106 |
| 5.1.6 | Morbidität aufgrund von psychischen und Verhaltensstörungen..... | 107 |
| 5.2 | Hitzeperioden..... | 109 |
| 5.2.1 | Retrospektive Analyse der Mortalität..... | 109 |
| 5.2.2 | Retrospektive Analyse der Morbidität..... | 112 |
| 5.2.3 | Auftreten von Hitzeperioden im Zuge des Klimawandels | 115 |
| 5.2.3.1 | Gebietsmittelwerte..... | 115 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.2.3.2 | Rasterdaten..... | 122 |
| 5.2.4 | Zukünftige Hitzeperioden und ihre Auswirkung auf die Mortalität | 125 |
| 5.2.4.1 | Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen..... | 125 |
| 5.2.4.2 | Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen..... | 129 |
| 5.3 | Auswirkungen einer Pollenbelastung auf Asthma | 131 |
| 5.3.1 | Pollen- und Morbiditätsdaten..... | 131 |
| 5.3.2 | Zusammenhang Birkenpollen und Asthma bronchiale..... | 135 |
| 5.3.3 | Zusammenhang Gräserpollen und Asthma bronchiale | 137 |
| 6 | Diskussion..... | 139 |
| 6.1 | Retrospektive Analyse der Mortalität..... | 139 |
| 6.2 | Analyse der Morbiditätsdaten | 144 |
| 6.3 | Der Einfluss weiterer meteorologischer und lufthygienischer Parameter | 146 |
| 6.4 | Einfluss des Klimawandels auf den Temperatureffekt | 148 |
| 6.5 | Auswirkungen zukünftiger Hitzeperioden | 151 |
| 6.6 | Pollenanalyse | 154 |
| 7 | Schlussfolgerungen..... | 156 |
| 8 | Quellenverzeichnis | 158 |
| A | Anhang | 187 |
| A.1 | Anhang zur Literaturstudie | 187 |
| A.1.1 | Anhänge zur Literaturstudie über Atemwegserkrankungen | 187 |
| A.1.2 | Anhänge zur Literaturstudie über psychische Störungen..... | 190 |
| A.2 | Anhang zu den Ergebnissen | 196 |
| A.2.1 | Anhänge zur Retrospektive Analyse | 196 |
| A.2.2 | Anhänge zu Hitzeperioden..... | 200 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Entwicklung der Jahresmittellufttemperatur in Deutschland von 1950 bis 2100 dargestellt mit verschiedenen Ensemble-Daten im historischen Verlauf und für drei RCP-Szenarien ab 2015 verglichen mit Beobachtungsdaten (HYRAS)..... | 37 |
| Abbildung 2: Studien (2001 – 2018) zur Saisonalität von Atemwegserkrankungen, Asthma, COPD und Atemwegsinfektionen, angegeben als sign. erhöhte Mortalität/Morbidität im Vergleich zum Gesamtjahr. | 43 |
| Abbildung 3: Studien (2001 – 2018) mit Angabe eines statistisch signifikanten Effekts von Kälte oder Hitze sowie der Zusammenhang mit ansteigender oder fallender Lufttemperatur auf die Mortalität oder Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen. | 45 |
| Abbildung 4: Vergleich des zeitlichen Wirkungsbereiches von Kälte und Hitze auf die Mortalität von Atemwegserkrankungen in Deutschland von 1990 bis 2006. | 51 |
| Abbildung 5: Übersicht der in Morbiditätsstudien (2001 – 2018) untersuchten Luftfeuchteparameter im Zusammenhang mit verschiedenen Krankheitsbildern und die daraus resultierenden Ergebnisse. 53 | |
| Abbildung 6: Anzahl der Morbiditätsstudien (2001 – 2018) mit Angaben zur Wirkung von Partikeln (PM ₁₀ , PM _{2,5} , TSP), Stickstoffdioxid (NO ₂), Schwefeldioxid (SO ₂), Ozon (O ₃) und Pollen auf Atemwegserkrankungen. | 58 |
| Abbildung 7: Studien (2001 – 2018) zur Saisonalität von psychischen Störungen angegeben als sign. erhöhte Mortalität / Morbidität im Vergleich zum Gesamtjahr, unterteilt in verschiedene Diagnosen, Mehrfachnennungen erlaubt. | 60 |
| Abbildung 8: Studien (2001 – 2018) mit Angabe eines statistisch signifikanten Effekts von Kälte oder Hitze sowie Korrelation mit ansteigender oder fallender Lufttemperatur auf die Mortalität oder Morbidität von psychischen Erkrankungen..... | 65 |
| Abbildung 9: Anzahl der Studien (2001 – 2018) zu Korrelationen des Luftdrucks, der Feuchte, Niederschlag und Bedeckung auf die Mortalität (T) und Morbidität (K) aufgrund von psychische Erkrankungen. | 67 |
| Abbildung 10: Studien (2001 – 2018) mit Aussagen zur Korrelation von Luftbeimengungen mit der Mortalität (T) und Morbidität (K) aufgrund von psychischen Störungen. | 69 |
| Abbildung 11: Karte der regionalen Auflösung der Morbiditäts- und Mortalitätsdaten in Deutschland und dazugehöriger Wetterstationen. | 75 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 12: Mittlere Lufttemperatur [°C] der Jahre 1981 – 2010 eines Modells des RCP8.5-Ensembles (GCM = EC-EARTH, RCM = RACMO, Realisierung = r1) als Beispiel für die räumliche Abdeckung der Klimaprojektionsdaten in Europa. | 79 |
| Abbildung 13: Darstellung der Schritte zur Bestimmung des Erwartungswertes (EW) der Mortalitätsrate (Fälle pro 2-Tage und 100 000 Personen) chronischer Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) der Jahre 2001 – 2015 mit der Abweichung vom Erwartungswert (Residuen) und der Gaußschen Tiefpassfilterung. | 81 |
| Abbildung 14: Morbiditätsrate und Jahresgang von Krankenhauseinlieferungen mit COPD (J44) für den Zeitraum 2001 bis 2015. | 81 |
| Abbildung 15: Morbiditätsrate, Jahresgang, Erwartungswert und Abweichungen vom Erwartungswert (Residuen) von COPD (J44) für den Zeitraum vom 01. Mai bis 30. September 2015. | 82 |
| Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperaturklassen [%] der Ensembledaten des Referenzzeitraumes 1981 – 2010 und das Relative Risiko (RR) der Mortalität aufgrund von chronischen unteren Atemwegserkrankungen (J40 – J47) und ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) pro Lufttemperaturklasse für Deutschland. | 84 |
| Abbildung 17: Flussdiagramm der Berechnungsschritte der Hitzewellen (HW) und ihrer Charakteristiken für drei verschiedene Zeiträume der Ensemble-Daten. Die Berechnung erfolgt für die drei Ensembles getrennt (Referenz-, RCP4.5 und RCP8.5-Ensemble). | 86 |
| Abbildung 18: Aufbau und Parameter einer Kontingenztafel für epidemiologische Fall-Kontroll-Studien. | 87 |
| Abbildung 19: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und der 2-tägigen Mortalitätsrate aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in den Jahren 2001 - 2015 für sieben Großregionen und den Deutschlandmittelwert. * | 90 |
| Abbildung 20: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in den Jahren 2001 - 2015 für sieben Großregionen und den Deutschlandmittelwert. | 90 |
| Abbildung 21: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) für zeitliche Verschiebungen von 0 bis 9 Tage für die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland. | 92 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 22: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) aufgrund von CLRD in Deutschland im Referenzzeitraum 1981 – 2010 (Vergleich HYRAS und historische Ensemble-Daten) und bis zum Ende des Jahrhunderts für zwei Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Dargestellt als Punkt (HYRAS) bzw. als Ensemble-Median (Punkt) im Wertebereich des Ensembles (vertikaler Balken) für die gesamte Temperaturspanne (grün), den Kältebereich (blau) und Wärmebereich (rot)..... | 93 |
| Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur in 0,1 °C-Klassen des historischen Ensembles (REF), der Beobachtungsdaten (HYRAS) und der Ensembles der beiden RCP-Szenarien in jeweils zwei Zukunftszeiträumen 2021-2050 und 2068-2097..... | 95 |
| Abbildung 24: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und der Mortalitätsrate aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen getrennt nach ICD-Gruppen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland. * | 97 |
| Abbildung 25: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen getrennt nach ICD-Gruppen in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschland. | 98 |
| Abbildung 26: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) [%] aufgrund von IHK in Deutschland im Referenzzeitraum 1981 – 2010 (Vergleich HYRAS und Ensemble-Daten) und bis zum Ende des Jahrhunderts für zwei Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Dargestellt als Punkt (HYRAS) bzw. als Ensemble-Median (Punkt) im Wertebereich des Ensembles (vertikaler Balken) für die gesamte Temperaturspanne (grün), den Kältebereich (blau) und Wärmebereich (rot)..... | 99 |
| Abbildung 27: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen unterteilt in verschiedene ICD-Gruppen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland..... | 101 |
| Abbildung 28: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität von chronischen unteren Atemwegserkrankungen (J40 – J47) für zeitliche Verschiebungen von 0 bis 7 Tagen für die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland..... | 104 |
| Abbildung 29: Gemittelter Wochengang der Morbiditätsrate von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) im Vergleich zum Wochengang der Morbiditätsrate aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschland..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 30: Jahresgang des Relativen Risikos von Krankenhausaufnahmen mit ischämischen Herzerkrankungen inklusive Feiertage in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschlands..... | 105 |
| Abbildung 31: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen unterteilt in verschiedene ICD-Gruppen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland. | 106 |
| Abbildung 32: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko von Suiziden der Jahre 2001 – 2015 für sieben Großregionen und den Deutschlandmittelwert..... | 107 |
| Abbildung 33: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität aufgrund von verschiedenen psychischen und Verhaltensstörungen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland. | 108 |
| Abbildung 34: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland..... | 109 |
| Abbildung 35: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) im Verlauf von 4-tägigen (links) bzw. 8-tägigen Hitzewellen (rechts) mit Tagen vor, während und nach den Hitzewellen..... | 110 |
| Abbildung 36: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) während Hitzewellen gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland. | 111 |
| Abbildung 37: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) im Verlauf von 4-tägigen (links) bzw. 8-tägigen Hitzewellen (rechts) mit Tagen vor, während und nach den Hitzewellen. | 112 |
| Abbildung 38: Prozentuale Abweichung der Morbidität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland..... | 113 |
| Abbildung 39: Prozentuale Abweichung der Morbidität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) im Verlauf von 4-tägigen (links) bzw. 8-tägigen Hitzewellen (rechts) mit Tagen vor, während und nach den Hitzewellen..... | 113 |
| Abbildung 40: Mittlere Anzahl der Hitzewellen-Tage pro Jahr im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland..... | 120 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 41: Mittlere Anzahl der Hitzewellen pro Jahr im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland..... | 120 |
| Abbildung 42: Mittlere Dauer der Hitzewellen im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Dauer in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland..... | 121 |
| Abbildung 43: Mittlere Intensität (T_a in °C) während Hitzewellen-Tagen im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland..... | 121 |
| Abbildung 44: Änderung der Anzahl der Hitzewellen-Tage im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten)..... | 122 |
| Abbildung 45: Änderung der mittleren Anzahl der Hitzewellen im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten)..... | 123 |
| Abbildung 46: Änderung der mittleren Dauer von Hitzewellen im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten)..... | 124 |
| Abbildung 47: Änderung der mittleren Lufttemperatur während Hitzewellen im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten). | 125 |
| Abbildung 48: Mittlere Anzahl der Hitzewellen-Tage (2-Tages-Definition) pro Jahr über einen 30-Jahres Zeitraum für Deutschland (Flächenmittelwert) eingeteilt anhand ihrer Dauer in drei Kategorien für den Referenzzeitraum vergleichend mit Beobachtungsdaten (HYRAS) und historischen Ensemble sowie für die zukünftigen Zeiträume für zwei RCP-Szenarien..... | 128 |
| Abbildung 49: Prozentuale Zunahme der CLRD-Mortalität (J40 – J47) und IHK-Mortalität (I20 – I25) während kurzer, mittlerer und langer Hitzewellen in der nahen (2021 – 2050) und fernen Zukunft (2068 – 2097) relativ zum historischen Referenzzeitraum für zwei RCP-Szenarien in Deutschland. | 129 |

Abbildung 50: Mittlerer Jahresgang der Pollenanzahl von Birke und Gräser, und
der Morbidität von Asthma bronchiale und Status asthmaticus
(J45, J46) in fünf Regionen in Deutschland über die Jahre
2001 – 2015.133

Abbildung 51: Odds Ratio (mit 95 % - Konfidenzintervall) für die Zusammenhänge
zwischen einer erhöhten Birkenpollenkonzentration (links)
oder einer erhöhten Gräserpollenkonzentration (rechts) und
Krankenhausaufnahmen mit einer J45- oder J46-Diagnose für
die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Der
Grenzwert der Pollenbelastung ist im Titel der jeweiligen Grafik
angegeben.136

Abbildung 52: Unterschied der Hitzewellendauer je nach Definition mit 1-Tages-
oder 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur im Sommer
2001 für den Deutschlandmittelwert.153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Studien mit Angabe eines thermischen Bereiches mit reduzierter
Mortalität/Morbidität oder Angabe zu Schwellenwerten des
Kälte- oder Wärmebereiches.45

Tabelle 2: Studien mit Angabe zum prozentualen Anstieg der Todesfälle pro
Abnahme / Zunahme der Temperatur um 1 °C.47

Tabelle 3: Studien mit Angabe zum prozentualen Anstieg der Krankheits- bzw.
Todesfälle pro Abnahme der Temperatur um 1 °C.48

Tabelle 4: Auswahl an Studien mit Angabe zum prozentualen Anstieg der
Krankheits- bzw. Todesfälle pro Zunahme der Temperatur um 1
°C.49

Tabelle 5: Mortalitätsstudien über den Zusammenhang zwischen
Luftbeimengungen und der Mortalität aufgrund von
Atemwegserkrankungen.57

Tabelle 6: Morbiditätsstudien mit einer Datenreihe > 1 Jahr, Fallzahl > 1000 und
mit Angaben zum saisonalen Auftreten von psychischen
Erkrankungen (ohne suizidales Verhalten).61

Tabelle 7: Auswahl umfangreicher Studien zu psychischen Erkrankungen und ihre
Aussagen über Saisonalität und Korrelationen mit
Sonnenscheindauer (SD) oder Globalstrahlung (G).62

Tabelle 8: Übersicht der Studien zu psychischen Erkrankungen mit Angaben zur
prozentualen Veränderung mit steigender Lufttemperatur oder
AT (apparent temperature).65

Tabelle 9: Übersicht über die vorhandenen Gesundheitsdaten mit ICD-10-Code,
Bezeichnung, Fallsumme und Anzahl der Geheimhaltungsfälle
(GF), der originalen räumlichen und zeitlichen Auflösung.74

| | |
|---|-----|
| Tabelle 10: Regionale Auflösung der Gesundheitsdaten in der NUTS-Auflösung, Aggregation auf sieben Großregionen in Deutschland mit Regionalcodes und den dazugehörigen Wetterstationen. Die Daten der Wetterstationen werden für die sieben Großregionen gemittelt..... | 76 |
| Tabelle 11: Auflistung der verwendeten Ensembledaten der beiden RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 mit den jeweiligen Modellläufen und dafür verwendeten globalen (GCM) und regionalen (RCM) Klimamodellen und Realisierungen (r1, r2, r12) (nach Brienen et al. (2020)). | 78 |
| Tabelle 12: Bewertung der Odds Ratio hinsichtlich der Exposition gegenüber dem (Risiko-) Faktor (nach Hedderich und Sachs (2016)). | 87 |
| Tabelle 13: Schwellenwerte, Minimum und Steigung des Relativen Risikos der Mortalität von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47)..... | 91 |
| Tabelle 14: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) [%] aufgrund chronischer unterer Atemwegserkrankungen (CLRD) im Referenzzeitraum (HYRAS und Ensemble-Daten) sowie die Veränderung für die Zukunftszeiträume bezogen auf den Referenzzeitraum. | 94 |
| Tabelle 15: Untere (SWu) und obere (SWo) Schwellenwerte der Lufttemperatur (T _a , jeweils Tagesmittelwert in °C) für die das Relative Risiko der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) über den Erwartungswert steigt und Steigungen von RR oberhalb der SWo. | 98 |
| Tabelle 16: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) [%] aufgrund ischämischer Herzerkrankungen (IHK) im Referenzzeitraum (HYRAS und Ensemble-Daten) sowie die Veränderung für die Zukunftszeiträume bezogen auf den Referenzzeitraum. In fett markiert sind signifikante Änderungssignale. | 100 |
| Tabelle 17: Schwellenwerte (SW, Tagesmittelwert der Lufttemperatur in °C) des Relativen Risikos der Morbidität von Atemwegserkrankungen, ab dem das RR signifikant über eins steigt und Steigungen (St) von RR oberhalb des Schwellenwertes für den Deutschlandmittelwert der Diagnosegruppen..... | 103 |
| Tabelle 18: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen unteren Atemwegserkrankungen (J40 – J47), ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) und Suiziden (X60 – X84) während Hitzewellen (gemittelt über die Hitzewellentage) im Zeitraum 2001 – 2015 in Deutschland..... | 110 |
| Tabelle 19: Prozentuale Abweichung der Morbidität von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschland. | 114 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 20: Prozentuale Abweichung der Morbidität von ischämischen Herzerkrankungen (Subtypen, Geschlecht) und verschiedener psychischen Störungen während Hitzewellen im Vergleich zum Erwartungswert gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland..... | 114 |
| Tabelle 21: Merkmale der Hitzewellen (HW) berechnet für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 mit dem historischen Ensemble für Deutschland und sieben deutsche Regionen. | 115 |
| Tabelle 22: Merkmale der Hitzewellen (HW) berechnet für den Zeitraum „nahe Zukunft“ 2021 – 2050 mit den Ensembledaten des RCP 4.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland..... | 116 |
| Tabelle 23: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Zeitraum „nahe Zukunft“ 2021 – 2050 mit den Ensembledaten des RCP 8.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland. Signifikante Änderungen in fett markiert. | 117 |
| Tabelle 24: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Zeitraum „ferne Zukunft“ 2068 – 2097 mit den Ensembledaten des RCP 4.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland. Signifikante Änderungen in fett markiert. | 118 |
| Tabelle 25: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Zeitraum „ferne Zukunft“ 2068 – 2097 mit den Ensembledaten des RCP 8.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland. Signifikante Änderungen in fett markiert. | 118 |
| Tabelle 26: Hitzewellen-Charakteristiken mit 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur für den Deutschlandmittelwert der HYRAS-Daten, historischen Ensemble-Daten sowie die prozentuale Änderung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts für zwei RCP-Szenarien. | 126 |
| Tabelle 27: Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen (HW) abhängig von ihrer Dauer und die Veränderung dieser Mortalität anhand zwei RCP-Szenarien für die nahe Zukunft (2021 – 2050) und ferne Zukunft (2068 – 2097) relativ zum historischen Referenzzeitraum in Deutschland und sieben Regionen..... | 127 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 28: Abweichung der IHK-Mortalität während Hitzewellen (HW) abhängig von ihrer Dauer und die Veränderung dieser Mortalität anhand zwei RCP-Szenarien für die nahe Zukunft (2021 – 2050) und ferne Zukunft (2068 – 2097) relativ zum historischen Referenzzeitraum in Deutschland und sieben Regionen. | 130 |
| Tabelle 29: Morbiditätsdaten (Krankenhausaufnahmen) der zusammengefassten Diagnosen Asthma bronchiale (ICD-10-Code J45) und Status asthmaticus (ICD-10-Code J46) für die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Geheimhaltungsfälle (GF) markieren Tage mit Fallzahlen zwischen 1 – 5 Fällen. | 132 |
| Tabelle 30: Tagesmittelwert, saisonales Maxima und Annual Pollen Integral der Birkenpollenkonzentration [P / m^3] der Jahre 2001 – 2015 von fünf Stationen in Deutschland. Das Maximum und das Annual Pollen Integral ist als Median der saisonalen Werte berechnet. | 132 |
| Tabelle 31: Grenzwerte für die Birkenpollenkonzentration, Saisonstart, -ende und durchschnittliche Dauer über die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Tagesmittelwert der Pollenkonzentration [P / m^3]. | 134 |
| Tabelle 32: Tagesmittelwert saisonales Maxima und Annual Pollen Integral der Gräserpollenkonzentration [P / m^3] der Jahre 2001 – 2015 von fünf Stationen in Deutschland. Das Maximum und das Annual Pollen Integral ist als Median der saisonalen Werte berechnet. | 134 |
| Tabelle 33: Grenzwerte für die Gräserpollenkonzentration, Saisonstart, -ende und durchschnittliche Dauer über die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Tagesmittelwert der Pollenkonzentration [P / m^3]. | 135 |
| Tabelle 34: Kontingenztabelle für den Zusammenhang zwischen Tagen mit einer Birkenpollenkonzentration größer $50 P / m^3$ und Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma bronchiale (J45) oder Status asthmaticus (J46) für die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland (ohne Lag-Effekt). | 135 |
| Tabelle 35: Kontingenztabelle für den Zusammenhang zwischen Tagen mit einer Gräserpollenkonzentration größer $30 P / m^3$ und Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma bronchiale oder Status asthmaticus (J45 – J46) für die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland (ohne Lag-Effekt). | 137 |
| Tabelle 36: Auswahl an Studien mit Angabe zur Veränderung der atemwegsbedingten Mortalität mit dem Anstieg der Lufttemperatur pro °C aus den Jahren 2001 – 2018 im Vergleich zur vorliegenden Untersuchung. | 140 |

Tabelle 37: Qualitativer Vergleich der hitzewellenbedingter Mortalität aufgrund ischämischer Herzerkrankungen aus der Vorläuferstudie und der vorliegenden Untersuchung.....143

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A 1: Studien zur Saisonalität von Atemwegserkrankungen (2001 – 2018) angegeben als sign. erhöhte Mortalität/Morbidität im Vergleich zum Gesamtjahr, unterteilt in verschiedene Altersgruppen der Studienteilnehmer.187

Abbildung A 2: Jahresverlauf der Morbiditätsrate aufgrund chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in Deutschland gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 und den dazu berechneten Erwartungswert und geglätteter Jahresgang.198

Abbildung A 3: Jahresverlauf der Mortalitätsrate aufgrund Asthma bronchiale und Status asthmaticus (J45 – J46) in Deutschland gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 und den dazu berechneten Erwartungswert und geglättetem Jahresgang.198

Abbildung A 4: Zusammenhang zwischen der Sonnenscheindauer (Zweitagesummen) und dem Relativen Risiko von Suiziden der Jahre 2001 – 2015 aufgeteilt in sieben Großregionen und für den Deutschlandmittelwert mit Konfidenzintervall.199

Abbildung A 5: Mittlere Anzahl der Hitzewellen-Tage pro Jahr im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in sieben Regionen in Deutschland.....201

Abbildung A 6: Mittlere Anzahl der Hitzewellen pro Jahr im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in sieben Regionen in Deutschland.202

Abbildung A 7: Mittlere Dauer der Hitzewellen im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in sieben Regionen in Deutschland.203

Abbildung A 8: Mittlere Intensität (Lufttemperatur in °C) der Hitzewellen im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland.204

Tabellenverzeichnis Anhang

| | |
|--|-----|
| Tabelle A 1: Mortalitätsstudien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und der Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen. | 187 |
| Tabelle A 2: Studien (2001 – 2018) mit einer Angabe über den Zusammenhang zwischen sowohl relativer Feuchte (RH) als auch absoluter Feuchte (AH) mit der Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen. | 188 |
| Tabelle A 3: Morbiditätsstudien (2001 – 2018) mit Fallzahl > 1000 mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftbeimengungen wie Partikeln, Gasen und Pollen und Atemwegserkrankungen.... | 189 |
| Tabelle A 4: Studien (2001 – 2018) zum saisonalen Auftreten von Suiziden, Suizidversuchen und weiteren Todesfällen aufgrund psychischer Erkrankungen..... | 190 |
| Tabelle A 5: Studien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftfeuchte, Niederschlag, Luftdruck und dem Auftreten von Symptomen psychischer Störungen..... | 192 |
| Tabelle A 6: Studien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftfeuchte, Niederschlag, Luftdruck und suizidalem Verhalten..... | 194 |
| Tabelle A 7: Studien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang von Luftbeimengungen und dem Auftreten von psychischen Störungen..... | 194 |
| Tabelle A 8: Schwellenwerte, Minimum und Steigung des Relativen Risikos der Mortalität von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) berechnet basierend auf dem Humidex (H) als Temperaturindex..... | 196 |
| Tabelle A 9: Untere (SWu) und obere (SWo) Schwellenwerte der Lufttemperatur (jeweils Tagesmittelwert in °C) für die das Relative Risiko der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (unterteilt in Untergruppen) über den Erwartungswert steigt und Steigungen von RR oberhalb der SWo. | 196 |
| Tabelle A 10: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund ischämischen Herzerkrankungen unterteilt in Subtypen und Geschlecht während Hitzewellen (gemittelt über alle Hitzewellentage) im Zeitraum 2001 – 2015 in Deutschland..... | 199 |
| Tabelle A 11: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 mit dem Beobachtungsdatensatz HYRAS für Deutschland und sieben deutsche Regionen. | 200 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle A 12: Hitzewellen-Charakteristiken mit 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur für sieben Regionen der historischen Ensemble-Daten sowie die prozentuale Änderung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts für zwei RCP-Szenarien..... | 205 |
| Tabelle A 13: Mittlere Anzahl der Hitzewellen (HW) und entsprechender Hitzewellentage pro Jahr (Definition mit Zweitages-Mittelwerten) für jeweils 30 Jahre des Referenzzeitraums (historisch), der nahen und fernen Zukunft für Deutschland und seine sieben Regionen. Die Hitzewellen sind in drei Kategorien anhand ihrer Dauer eingeteilt. | 206 |
| Tabelle A 14: Mittlere Anzahl der Hitzewellen (HW) und entsprechender Hitzewellentage pro Jahr (Definition mit Ein-Tages-Werten) für jeweils 30 Jahre des historischen Referenzzeitraums, der nahen und fernen Zukunft für Deutschland und seine sieben Regionen. Die Hitzewellen sind in drei Kategorien anhand ihrer Dauer eingeteilt. | 207 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Erläuterung |
|-----------------|---|
| AK | Atemwegserkrankungen |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit |
| CI | Konfidenzintervall |
| CLRD | Chronische Erkrankungen der unteren Atemwege (chronic lower respiratory-diseases) |
| COPD | Chronische obstruktive Lungenerkrankung (Chronic Obstructive Pulmonary Disease) |
| Destatis | Statistisches Bundesamt, Wiesbaden |
| EAN | European Aeroallergen Network |
| G | Globalstrahlung |
| GAM | Generalized Additive Model |
| GCM | Globales Klimamodell |
| GF | Geheimhaltungsfall |
| H | Humidex |
| HW | Hitzewellen |
| ICD | International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems |
| IHK | Ischämische Herzerkrankungen |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| K | Kelvin |
| KVK | Kardiovaskuläre Krankheiten |
| NUTS | Nomenclature des unités territoriales statistiques / Systematik der Gebiets-einheiten für die Statistik |
| P | Pollenkörner |
| PID | Polleninformationsdienst |
| RCM | Regionales Klimamodell |
| RCP | Repräsentativer Konzentrationspfad (Representative Concentration Pathway) |
| RH | Relative Feuchte |
| RR | Relatives Risiko |
| RRmean | Mittleres Relatives Risiko der über alle Temperaturklassen |
| SD | Sonnenscheindauer |
| SW | Schwellenwert |
| SWo | Oberer Schwellenwert der Lufttemperatur |
| SWu | Unterer Schwellenwert der Lufttemperatur |
| TAM | Temperatur-Assoziierte Mortalität |
| Ta | Lufttemperatur |
| TTk | Temperaturklasse |
| UBA | Umweltbundesamt |
| VP | Wasserdampfdruck |

Zusammenfassung

Die weltweite Zunahme atemwegsbedingter Krankheits- und Sterbefälle erfordert die Untersuchung möglicher Einflussfaktoren. Hierbei mehren sich die Hinweise über den Einfluss der Wetterbedingungen. Das Ziel des vom Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und nukleare Sicherheit (BMU) geförderte UFOPlan-Projekts (Laufzeit 2017 - 2021) ist es, den Einfluss des Klimawandels auf die Mortalität und Morbidität in Deutschland zu untersuchen. Dazu werden zunächst Zusammenhänge zwischen meteorologischen und lufthygienischen Faktoren und der Mortalität und Morbidität (Krankenhausaufnahmen) aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (CLRD) (International Classification of Disease [ICD-10] Codes J40 – J47) wie Asthma bronchiale, chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) und Bronchitis in Deutschland identifiziert. Als Vergleichsgruppe und als Fortsetzung vorhergegangener Untersuchungen werden auch Fälle von ischämischen Herzerkrankungen (IHK) (ICD-10-Codes I20 – I25), Suizide sowie einige psychische und Verhaltensstörungen analysiert.

Im Rahmen der **Literaturrecherche** des Projektes wurden mehrere medizinische Datenbanken (u.a. PubMed) nach aktuellen Forschungsergebnissen der Jahre 2001 bis 2018 durchsucht. Die Auswertung zeigt eine Vielzahl an Studien auf, die den Zusammenhang zwischen Wetter und Atemwegserkrankungen untersuchen und einen Einfluss der Jahreszeiten, der thermischen Bedingungen, Luftfeuchte und lufthygienischen Bedingungen belegen. Im Winter sind Mortalität und Morbidität deutlich erhöht, ganzjährig wirken sich niedrige Lufttemperaturwerte (T_a) oder eine rasche Abkühlung belastend auf die Atemwege aus. Dieser Kälteeffekt wird von den meisten Studien bestätigt und gilt sowohl für die akuten Entzündungen als auch die chronischen Erkrankungen. Aber auch hohe T_a -Werte, beispielsweise während mehrtägig anhaltenden Hitzeperioden, zeigen einen negativen Einfluss auf Atemwegserkrankungen. Der Hitzeeffekt wird von fast ebenso vielen Studien bestätigt und teilweise mit einem stärkeren Anstieg der Mortalität bzw. Morbidität verbunden, als die Reaktion auf Kälte. Die gesundheitliche Verschlechterung tritt gleichzeitig mit dem T_a -Anstieg auf, während der Kälteeffekt erst verzögert zu erkennen ist. Welche Erkrankung der Atemwege von Hitze oder Kälte stärker negativ beeinflusst wird, schwankt in der Literatur je nach Untersuchungsgebiet und den gewählten thermischen Parametern. Kinder und ältere Menschen werden durchgehend als am stärksten betroffene Gruppe genannt.

Die Luftfeuchte ist ebenfalls relevant für Atemwegserkrankungen, da trockene Luft die Schleimhäute austrocknet und eine Infektion durch Viren erleichtert, hohe Luftfeuchte kann das Atmen jedoch auch erschweren und die Anzahl von Allergenen wie Hausstaubmilben und Schimmelpilzen in der Luft erhöhen. Weitere meteorologische Faktoren wie Wind, Luftdruck und Gewitter werden ebenfalls mit dem Auftreten von Atemwegsbeschwerden in Zusammenhang gebracht, sind aber in Studien deutlich seltener vertreten.

Eine hohe Anzahl an Studien untersucht den Einfluss von Luftbeimengungen wie Feinstaub, Stickstoffoxide (NO , NO_2), Ozon (O_3) und Schwefeldioxid (SO_2) auf Asthma bronchiale und andere Atemwegsbeschwerden, hierbei werden vor allem Kinder in den Fokus gestellt. Die meisten Studien zeigen einen negativen Einfluss der untersuchten Luftbeimengungen. Schwierigkeiten in der Analyse ergeben sich aus den saisonalen Unterschieden im Auftreten der Gase, aus dem Zusammenhang und den Wechselwirkungen meteorologischer und lufthygienischer Komponenten und aus der unterschiedlichen Belastung im ländlichen und urbanen Raum. Viele Studien werden in asiatischen Ländern durchgeführt, was die Übertragung der Ergebnisse auf deutsche klimatische Verhältnisse erschwert.

Atemwegsbedingte Beschwerden können auch durch inhalative Allergene wie Baum- oder Gräserpollen ausgelöst werden. Die Rolle des Wetters, der Witterung sowie von klimatischen Veränderungen auf die Pollensaison und Pollenemission ist jedoch sehr vielfältig und regional unterschiedlich. Studien zum Einfluss von Pollen zeigen kein einheitliches Bild auf Mortalität oder Krankenhausbesuche. Ein Grund für diese Ergebnisse kann der Verlauf der allergischen Symptome sein, der meist keine intensive medizinische Behandlung wie einen Krankenhausbesuch notwendig macht.

Auch auf ischämische Herzerkrankungen hat das Wettergeschehen einen Einfluss, dies wird in vielen Studien untersucht und gilt als gut belegt. Wichtigster Faktor sind die thermischen Bedingungen. Im Winter sind die Fallzahlen zwar grundsätzlich deutlich erhöht, unter Berücksichtigung des Jahresganges liegt das Risiko eines Herzinfarktes während einer Hitzeperiode jedoch um ein Vielfaches höher. Auch rasche Temperaturänderungen und –schwankungen können das Risiko erhöhen. Ebenfalls empirische Nachweise gibt es für indirekte Einflüsse, wie beispielsweise ausgelöst durch Luftschadstoffe und Allergene.

Ein Zusammenhang zwischen dem Wetter und dem Auftreten von psychischen Erkrankungen wird deutlich weniger untersucht und ist schwieriger nachzuweisen. Je nach Diagnose weisen die Erkrankungen einen Jahresgang mit einem Maximum im Frühling (Suizidales Verhalten), Sommer (Bipolare Störungen) oder Winter (Depressive Störungen) auf. Der Anstieg vor allem von suizidalem Verhalten im Frühling wird in der Literatur häufig der zunehmenden Sonnenscheindauer, den wärmeren Temperaturen und damit einhergehenden hormonellen Veränderungen zugeschrieben. Der Nachweis, dass der Zusammenhang auch ohne Bezug zum Jahresgang bestand hat ist jedoch schwierig. Heiße Tage und vor allem warme Nächte führen zu einer schlechteren Schlafqualität und Medikamentenverträglichkeit, was das Auftreten von Symptomen deutlich erhöht.

Die Mortalitäts- und Morbiditätsdaten für die **retrospektive Analyse** des Projektes für den Zeitraum 2001 – 2015 wurden in täglicher oder zweitäglicher Auflösung vom Forschungsdatenzentrum des Bundes bereitgestellt und für sieben aggregierte Regionen in Deutschland ausgewertet. Für die Morbiditätsanalyse standen Informationen zu Krankenhausaufnahmen zur Verfügung. Für das in den Analysen verwendete Relative Risiko (RR) der Mortalität und Morbidität wurden die Daten trendbereinigt und der Einfluss des Jahresganges und Wochenganges (von Krankenhausaufnahmen) herausgerechnet.

Die Mortalität sowie die Morbidität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (CLRD) zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der thermischen Umgebung. Das Mortalitätsrisiko steigt ab einer T_a (Tagesmittelwert) von ca. 17,7 °C (Schwellenwert zum Hitzeeffekt) um durchschnittlich 3,6 % pro °C an. Bei T_a -Werten über 26 °C ist die Mortalität um ca. 40 % gegenüber dem Erwartungswert erhöht. Mit abnehmender T_a steigt das RR nur geringfügig an, die Abweichung der Mortalität erreicht maximal 5 %, obwohl die absoluten Fallzahlen im Winter deutlich höher liegen als im Sommer. Das Morbiditätsrisiko (Krankenhausaufnahmen) steigt mit zunehmender T_a oberhalb von ca. 2,4 °C um ungefähr 0,3 % pro °C. An kalten Tagen ist das Risiko reduziert, unter extremer Hitzebelastung steigt es exponentiell an. Die Auswirkungen von Hitze lassen sich auch während mehrtägig andauernder Hitzeperioden mit einer durchschnittlichen Abweichung vom Erwartungswert von 18,1 % der Mortalitätsrate (Fälle pro Tag und 100 000 Personen) bzw. 5,8 % der Morbiditätsrate und Maximalwerten von ca. 32 % bzw. 16 % (Mortalität und Morbidität) nachweisen. Auch der erste Tag nach einer Hitzeperiode weist immer noch ein deutlich erhöhtes Risiko auf. Die Gruppe der chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege wird hauptsächlich von Fällen mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD) dominiert, daher gelten die genannten Risikowerte vor allem für diese Erkrankung. Unterteilt nach Geschlecht, ist das hitzebedingte Morbiditätsrisiko stärker ausgeprägt in der weiblichen als in

der männlichen Bevölkerung. Krankenhausaufnahmen mit Asthma bronchiale zeigen keine Zunahme an heißen Tagen. Das dazugehörige RR ist im mittleren T_a -Bereich am höchsten, abnehmende und zunehmende T_a -Werte führen zu einem geringeren Risiko.

Die Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (IHK) weist ebenfalls eine starke Abhängigkeit von der Lufttemperatur auf. Das RR steigt ab Tagesmittelwerten von T_a von 17.6 °C (Schwellenwert zum Hitzeeffekt) um ca. 2,6 % pro °C an, bei Tagesmittelwerten von ca. 30 °C ist die Mortalität um 40 % gegenüber dem Erwartungswert erhöht. Hier zeigt sich, dass die Mortalität der ischämischen Herzerkrankungen schwächer von den Auswirkungen der Hitze betroffen sind als chronische Atemwegserkrankungen. Hitzeperioden haben auf ischämische Sterbefälle mit einer durchschnittlichen Abweichung von 10,8 % und Maximalwerten von bis zu 25 % ebenfalls einen schwächeren Einfluss als auf die chronischen Atemwegserkrankungen. Auch hier zeigt sich in der weiblichen Bevölkerung eine stärkere Belastung. Kalte Tage und Kälteperioden haben mit einem ansteigenden Risiko einen größeren Einfluss auf die ischämische als auf atemwegsbedingte Mortalität. Während Kälteperioden ist die ischämische Mortalität um durchschnittlich 2.5 % erhöht, die Abweichung kann aber an einzelnen Tagen während und nach der Kälteperiode bis zu 10 % erreichen.

Die IHK-Morbidität konnte in keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Lufttemperatur gebracht werden. Ein stark ausgeprägter Wochengang, Einfluss von Feiertagen und eine vermutlich hohe Anzahl an geplanten Eingriffen in den Daten der Krankenhausaufnahmen macht die Auswertung schwierig. Die Krankenhausaufnahmen aufgrund von psychischen und Verhaltensstörungen zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang mit T_a , an sehr kalten oder sehr heißen Tagen kann, je nach Diagnose, das Risiko erhöht sein.

Todesfälle aufgrund eines Suizides zeigen in Deutschland einen klaren Jahresgang mit dem Maximum im Frühling und Frühsommer. In dieser Studie steht das RR von Suiziden in einem nicht signifikanten positiven Zusammenhang zur T_a sowie zur Sonnenscheindauer. Während Hitzeperioden ist ein leichter Anstieg von Suiziden zu erkennen, während Kälteperioden ist das Risiko reduziert.

Die regionale Auswertung zeigt eine geringere Kältesensitivität in den Regionen Nord, Süd-Ost und Ost anhand niedriger Temperatur-Schwellenwerte zum risikobelasteten Bereich der Kälte an. Die Regionen West, Mitte und Süd-West haben eine höhere Kältesensitivität, dafür aber eine geringere Hitzesensitivität, was sich in höheren Schwellenwerten zum Hitzestress zeigt. Da aber extreme T_a -Werte fast ausschließlich in diesen Regionen auftreten, steigt RR oberhalb des Schwellenwertes stark an. Diese regionalen Unterschiede lassen sich durch die klimatischen Unterschiede in Deutschland und daraus resultierender Akklimatisierung der Einwohnerinnen und Einwohner, aber auch durch Unterschiede in der Demographie und Dichte der ärztlichen Versorgung erklären.

Die retrospektive Analyse der Pollenbelastung hat gezeigt, dass sowohl Birkenpollen als auch Gräserpollen einen Risikofaktor darstellen können, aufgrund der Diagnose Asthma bronchiale oder Status asthmaticus in ein Krankenhaus aufgenommen werden zu müssen. Dies gilt vor allem in den Regionen West und Süd-West, für die Region Ost konnte kein Zusammenhang gefunden werden. Je nach gewähltem Grenzwert der Pollenanzahl und der Berücksichtigung eines eintägigen Lag-Effektes ist das Risiko einer Krankenhausaufnahme an Tagen mit hoher Pollenbelastung um das 2- bis 3-fache erhöht.

Die Abschätzung des **Klimawandels** und seiner Folgen auf die Mortalität erfolgt mittels Ensembledaten bestehend aus regionalen Klimasimulationen, welche die Entwicklungen des zukünftigen Klimas sowohl auf der Basis des moderaten Klimaschutzszenarios RCP4.5 (Representative Concentration Pathways) als auch auf dem „weiter-wie-bisher“ Szenarios RCP8.5 projizieren.

Durch die Betrachtung beider RCP-Szenarien des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) entsteht in den Ergebnissen eine Bandbreite zukünftiger Entwicklungen. Aufgrund der teilweise wenig belastbaren Ergebnisse für die Morbidität (v.a. IHK) in der retrospektiven Analyse, beschränkt sich die Auswertung zum Klimawandel auf die Auswirkungen auf die Mortalität.

Im Fokus der Untersuchung stand die Auswertung der zukünftigen Entwicklung der T_a und von Hitzeperioden und ihren Auswirkungen auf den in der retrospektiven Analyse gefunden Zusammenhang mit der Mortalität. Die Abschätzung der Temperatur-Assoziierten Mortalität (TAM) erfolgte daher sowohl für den gesamten T_a -Bereich als auch für den T_a -Bereich, der den Wärme-Effekt umschließt und mit dem oberen Schwellenwert des jeweiligen Mortalitätsrisikos markiert wird ($T_a > 17.7^\circ\text{C}$ bei CLRD bzw. 17.6°C bei IHK). Vergleichend wird die TAM auch für den Bereich des Kälte-Effektes berechnet, der deutlich kleiner ausfällt (Tage mit $T_a < -6,6^\circ\text{C}$ bei CLRD bzw. $2,1^\circ\text{C}$ bei IHK).

Die Temperatur-Assoziierte-Mortalität (TAM) für den gesamten T_a -Bereich zeigt in beiden RCP-Szenarien eine kontinuierliche und signifikante Zunahme sowohl für die nahe (2021 – 2050) als auch die ferne Zukunft (2068 – 2097) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 - 2010. Die CLRD-TAM liegt im Referenzzeitraum bei 0,1 % (Deutschland als Flächenmittelwert); die Zunahme dieser TAM beträgt bis zur Mitte des Jahrhunderts 0,4 %, was einer Vervierfachung entspricht. In der fernen Zukunft sagen die Klimasimulationen eine CLRD-TAM von 0,9 % (RCP4.5) bzw. 2,0 % (RCP8.5) voraus. Hier zeigt sich im Gegensatz zu den Ergebnissen der nahen Zukunft ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden RCP-Szenarien. Eine um 2,0 % erhöhte Mortalität, die dem Einfluss der T_a zugeschrieben wird, klingt zunächst nach einem geringen Betrag, bedeutet aber eine Zunahme der TAM aus dem Referenzzeitraum um das 20-fache. Die Zunahme der TAM, die über den gesamten T_a -Bereich berechnet wird, zeigt, dass die Abnahme der Tage mit niedriger mittleren T_a und dem damit verbundenen geringeren Risiko nicht das wachsende Risiko zunehmend warmer und heißer Tage ausgleichen kann. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der TAM, wenn nur der T_a -Bereich unterhalb des unteren Schwellenwertes (Kälte-TAM) bzw. nur der Bereich oberhalb des oberen Schwellenwertes (Wärme-TAM) zur Berechnung verwendet wird. Die CLRD-Wärme-TAM liegt im Referenzzeitraum bereits bei 5,9 % (Deutschland als Flächenmittelwert) und steigt auf 7,2 % in der nahen Zukunft und auf 7,9 % bis 10,3 % in der fernen Zukunft. Dagegen zeigt die CLRD-Kälte-TAM keine signifikante Änderung anhand der RCP-Szenarien in Deutschland als Flächenmittelwert.

Die Beobachtung, dass eine Reduktion der Kälte-assozierten Mortalität den Anstieg der Wärme-assozierten Mortalität nicht ausgleichen kann, kann durch die Ergebnisse der IHK-Mortalität bestätigt werden. Hier zeigt das RR einen schwachen aber kontinuierlichen Anstieg im T_a -Bereich, was sich in einer um 1,2 % erhöhten Kälte-TAM im Referenzzeitraum widerspiegelt. Diese nimmt bis zur Mitte und Ende des Jahrhunderts signifikant um 0,1 % bis 0,2 % ab. Die IHK-Wärme-TAM wird mit einem starken Anstieg beschrieben, der bis zur Mitte des Jahrhunderts 0,7 % bis 0,8 % beträgt und bis zum Ende des Jahrhunderts eine 1,1 % bzw. 2,4 % Zunahme beschreibt (RCP4.5 bzw. RCP8.5). Das bedeutet, dass im Zeitraum 2068 – 2097 sich die IHK-Wärme-TAM im Mittel in Deutschland fast verdoppelt und eine um 5,4 % erhöhte IHK-Mortalität aufgrund von warmen und heißen Tagen herrscht. Die IHK-TAM des gesamten T_a -Bereichs steigt demnach ebenfalls an, im RCP8.5-Szenario zum Ende des Jahrhunderts signifikant um 0,8 % auf 0,9 % insgesamt. Im Vergleich zu den TAM-Werten der CLRD-Mortalität sind sowohl die IHK-TAM-Werte im Referenzzeitraum als auch die Zunahmen bis Ende des Jahrhunderts nur etwas mehr als halb so hoch. Damit bestätigt sich das Ergebnis, dass die CLRD-Mortalität stärker von Wärme und Hitze betroffen ist als die IHK-Mortalität.

Die Ensembledaten geben für den Referenzzeitraum eine mittlere Anzahl von 13 Hitzewellentagen an (Deutschlandmittelwert). Für die nahe Zukunft (2021 – 2050) konnte eine mittlere Anzahl von 22 – 23 Hitzewellentagen (HW) bestimmt werden, der fernen Zukunft (2068 – 2097) steigt die Zahl der HW-Tage auf 31 (RCP4.5) bzw. auf 54 Tage (RCP8.5) an. Die Anzahl der Hitzewellen/Jahr steigt mit dem RCP8.5-Szenario um 1,3 bzw. 3,7 Episoden (2021 – 2050 bzw. 2968 – 2097), die Dauer der Hitzewellen auf 6,2 bzw. 8,7 Tage, die durchschnittliche Intensität steigt auf 22,3 – 23,2 °C (RCP8.5, 2021 – 2050 bzw. 2968 – 2097). Die Zunahme innerhalb des RCP4.5-Szenarios bleibt also zwischen dem Referenzzeitraum, der nahen und der fernen Zukunft annähernd konstant, während das RCP8.5-Szenario vor allem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen eher exponentiellen Anstieg beschreibt.

Die Veränderung der Hitzewellen in ihrer Häufigkeit, Dauer und Intensität im Zuge des Klimawandels zeigt regionale Unterschiede auf. So ist sowohl in den Ergebnissen für die regionalen Flächenmittelwerte als auch in den Ergebnissen der Rasterdaten zu erkennen, dass sich vor allem der Süden, die Mitte und teilweise der Westen Deutschlands stärker erwärmt (die Intensität der Hitzewellen steigt) und die Häufigkeit der Hitzewellen und Hitzewellentage verstärkt zunimmt.

Die Charakteristiken der Hitzewellen, ihre Anzahl, Dauer und Intensität sowie ihr Auftreten in der Saison sind für die Abschätzung der gesundheitlichen Belastung während und nach Hitzewellen relevant. Vor allem die Dauer der Hitzewelle kann die Mortalität verstärken und die überproportionale Zunahme langer Hitzewellen kann daher zu einer stark ansteigenden Zahl von Todesfällen während Hitzewellen führen. So geben beide RCP-Szenarien einen Anstieg der CLRD-Mortalität während langer Hitzewellen (≥ 10 Tage) von bis zu 150 % bis zur Mitte des Jahrhunderts und 260 % (RCP4.5) bis maximal 540 % (RCP8.5) Zunahme am Ende des Jahrhunderts. Die IHK-Mortalität könnte demnach 2021 – 2050 um 90 % bzw. 150 % (RCP4.5 bzw. RCP8.5) höher liegen, 2068 – 2097 sogar um 330 % (RCP4.5) bis maximal 900 % (RCP8.5). Die hohen Prozentzahlen ergeben sich durch die Änderung eines relativ kleinen Nenners, hier die Anzahl der HW-Tage während langer Hitzewellen von historisch 2,7 Tagen auf 27,5 Tage Ende des Jahrhunderts, verrechnet mit einer erhöhten Mortalität von 13,6 % pro Tag einer langen Hitzewelle.

Die hitzebedingte Mortalität und Morbidität nimmt in Hinblick auf den Klimawandel eine bedeutende Rolle ein. Auswirkungen des Klimawandels, wie die zunehmende Hitzebelastung, wirken sich bereits auf die Gesundheit in Deutschland aus. Vor allem Menschen mit chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege leiden verstärkt unter hohen Temperaturen und während Hitzewellen. Dies hebt die Bedeutung der chronischen Atemwegserkrankungen bei Präventionsmaßnahmen und Aufklärung hervor. Die Verknüpfung der Ergebnisse der retrospektiven Analyse mit den beiden RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 zur zukünftigen klimatischen Entwicklung in Deutschland zeigt, dass der Klimawandel in Deutschland mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem deutlichen Anstieg der hitzebedingten Mortalität führen wird. Die Ergebnisse dieser Studie betonen daher den Bedarf einer weiteren Verstärkung von Klimaschutzmaßnahmen und deutlichen Reduktion von Treibhausgasemissionen, damit eine Entwicklung wie in RCP8.5-Szenario berechnet vermieden werden kann.

Summary

The worldwide increase in respiratory illnesses and deaths requires investigation of possible influencing factors. Increasing evidence of the influence of weather conditions exists. The aim of the UFOPlan project (duration 2017 - 2021), which is funded by the German Environment Agency and the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), is to estimate the influence of climate change on mortality and morbidity in Germany. To this end, associations between meteorological and air quality factors and mortality and morbidity (hospital admissions) due to chronic lower respiratory tract diseases (CLRD) (International Classification of Disease [ICD-10] codes J40 - J47) such as bronchial asthma, chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and bronchitis in Germany will be identified. For comparison and as a continuation of previous studies, cases of ischemic heart disease (IHC) (ICD-10 codes I20 - I25), suicides, and different mental and behavioral disorders are analyzed, too.

As part of the project's **literature search**, several medical databases (including PubMed) were searched for recent research from 2001 to 2018. The review reveals a large number of studies examining the relationship between weather and respiratory disease, demonstrating an influence of seasons, thermal conditions, humidity, and air quality conditions. Mortality and morbidity are significantly increased in winter, and year-round low air temperatures (T_a) or rapid cooling have a stressful effect on the respiratory system. This cold effect is confirmed by most studies and applies to both acute inflammation and chronic disease. However, high T_a values, for example during several days of persistent heat, also show a negative influence on respiratory diseases. The heat effect is confirmed by almost as many studies and sometimes associated with a greater increase in mortality or morbidity than the response to cold. The health deterioration occurs simultaneously with the T_a increase, while the cold effect is delayed. Which specific respiratory disease is affected more negatively by heat or cold varies in the literature depending on the study area and the thermal parameters chosen. Children and elderly people are consistently named as the most affected group.

Air humidity is relevant to respiratory diseases, too, as dry air dries out mucous membranes and facilitates viral infection, high humidity, however, can also exacerbate breathing and increases the number of allergens such as dust mites and mold in the air. Other meteorological factors such as wind, barometric pressure, and thunderstorms are also associated with the occurrence of respiratory symptoms, but are much less common in studies.

A large number of studies have investigated the influence of air pollutants such as particulate matter, nitrogen oxides (NO, NO₂), ozone (O₃), and sulfur dioxide (SO₂) on bronchial asthma and other respiratory symptoms, with a particular focus on children. Most studies show a negative influence of the investigated air pollutants. Difficulties in the analysis arise from the seasonal differences in the occurrence of the gases, from the correlation and interactions of meteorological and air quality components and from the different exposure in rural and urban areas. Many studies are conducted in Asian countries, which makes it difficult to transfer the results to German climatic conditions.

Respiratory symptoms can also be triggered by inhaled allergens such as tree or grass pollen. However, the role of weather and climatic changes on pollen season and pollen emission is very diverse and regionally different. Studies on the influence of pollen do not show a consistent picture on mortality or hospital visits. One reason for these results may be the course of allergic symptoms, which usually does not require intensive medical treatment such as a hospital visit.

Ischemic heart diseases can also be influenced by weather conditions; this has been investigated in many studies and is considered as well documented. The most important factor are thermal

conditions. In winter, generally the number of cases is significantly higher, but taking into account the annual cycle, the risk of myocardial infarction during a hot spell is several times higher. Rapid changes in temperature can increase the risk, too. It exists also empirical evidence for indirect influences, such as those triggered by air pollutants and allergens.

A connection between weather and the occurrence of mental illnesses is studied much less and is more difficult to prove. Depending on the diagnosis, the disorders show an annual cycle with a maximum in spring (suicidal behavior), summer (bipolar disorders) or winter (depressive disorders). The increase especially of suicidal behavior in spring is often attributed in the literature to the increasing sunshine duration, warmer temperature and accompanying hormonal changes. However, proving that the relationship existed without reference to the seasonal cycle is difficult. Hot days and especially warm nights lead to poorer sleep quality and drug tolerance, which significantly increases the incidence of symptoms.

The mortality and morbidity data for the **retrospective analysis** of the project for the period 2001 - 2015 were provided in daily or two-daily resolution by the Research Data Center of the Federal Government and evaluated for seven aggregated regions in Germany. For the morbidity analysis, information on hospital admissions was available. For the Relative Risk (RR) of mortality and morbidity used in the analyses, the data were trend-adjusted and the influence of the annual and weekly frequency (of hospital admissions) was removed.

Mortality as well as morbidity from chronic lower respiratory diseases (CLRD) show a distinct dependence on the thermal environment. Mortality risk increases by an average of 3.6 % per °C above a T_a (daily mean) of about 17.7 °C (threshold for heat effect). At T_a -values above 26 °C, mortality is increased by about 40 % compared to the expected value. With decreasing T_a , RR increases only slightly, and the deviation in mortality reaches a maximum of 5 %, although the absolute case numbers are significantly higher in winter than in summer. The risk of morbidity (hospital admissions) increases from about 2.4 °C by about 0.3 % per °C increase in T_a . On cold days, the risk is reduced; under extreme heat stress, the increase is exponentially. The effects of heat can also be demonstrated during heat waves lasting several days, with an average deviation of 18.1 % from the expected value of the mortality rate (cases per day per 100 000 inhabitants) and 5.8 % of the morbidity rate, and maximum values of about 32 % respectively 16 % (mortality and morbidity). Even the first day after a hot spell still shows a significantly increased risk. The group of chronic lower respiratory diseases is mainly dominated by cases with chronic obstructive pulmonary disease (COPD), therefore the risk values above apply mainly to this disease. Subdivided by gender, heat-related morbidity risk is more pronounced in the female population. Hospital admissions with bronchial asthma show no increase on hot days. The associated RR is highest in the medium range of T_a , decreasing and increasing T_a lead to a lower risk.

Mortality due to ischemic heart diseases (IHD) also shows a strong dependence on air temperature. The RR increases from daily mean values of T_a of 17.6 °C (threshold value for the heat effect) by approx. 2.6 % per °C; at daily mean values of approx. 30 °C, the morbidity is increased by 40 % compared to the expected value. This shows that IHD mortality is less affected by heat than chronic respiratory diseases. This also holds good for the effect of heat waves on ischemic deaths with an average deviation of 10.8% and maximum values of up to 25 %. Here, too, a stronger burden is evident in the female population. Cold days and cold periods with increasing risk have a greater influence on ischemic than on respiratory mortality. During cold periods, IHD mortality is increased by an average of 2.5 %, but the deviation can reach up to 10 % on single days during and after the cold period.

The IHD morbidity could not be related to the air temperature clearly. A strongly pronounced weekly variation, influence of holidays and a presumably high number of planned interventions

make the evaluation difficult. Hospital admissions with mental and behavioral disorders show no district relationship with T_a , on very cold or very hot days, depending on the diagnosis, the risk may be increased. Deaths due to suicide show a clear annual pattern in Germany with a maximum in spring and early summer. In this study, the RR of suicides is not significantly positively related to T_a as well as to sunshine duration. During heat periods, a slight increase in suicides was found, while during cold periods the risk is reduced.

The regional evaluation indicates a lower sensitivity to cold in the North, South-East and East on the basis of lower temperature thresholds to the cold effect. The West, Central, and South-West regions have higher cold sensitivity but lower heat sensitivity, as indicated by higher thresholds to heat stress. However, because extreme T_a values occur almost exclusively in these regions, the RR increases sharply above the threshold. These regional differences can be explained by the climatic differences in Germany and the resulting acclimatization of inhabitants, but also by differences in demography and density of medical care.

The retrospective analysis of pollen exposure has revealed that both birch pollen and grass pollen can be a risk factor for hospitalization due to the diagnosis of bronchial asthma or status asthmaticus. This is especially true in the West and South-West regions; no significant correlation was found for the East region. Depending on the selected threshold value of pollen count and the consideration of a one-day lag effect, the risk of hospital admission on days with high pollen load is increased by 2 to 3 times.

The assessment of **climate change** and its impact on mortality is based on ensemble data consisting of regional climate simulations that project future climate developments based on both the moderate climate change scenario RCP4.5 (Representative Concentration Pathways) and the "business-as-usual" scenario RCP8.5. By considering both RCP scenarios of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), a range of future developments emerges in the results. Due to the partially unreliable results for morbidity (especially IHD) in the retrospective analysis, the evaluation on climate change is limited to the effects on mortality.

The focus of the study was the evaluation of the future development of T_a and heat waves and their impact on the association with mortality found in the retrospective analysis. Therefore, the estimation of temperature-associated mortality (TAM) was performed for the entire T_a range as well as for the T_a range encompassing the heat effect, which is marked with the upper threshold of the respective mortality risk ($T_a > 17.7^\circ\text{C}$ for CLRD and 17.6°C for IHD, respectively). Comparatively, the TAM is also calculated for the T_a range of cold effect.

The temperature-associated mortality (TAM) for the entire T_a range shows a continuous and significant increase in both RCP scenarios for the near future (2021 – 2050) and the far future (2068 – 2097) compared to the 1981 – 2010 reference period. The CLRD-TAM is 0.1 % in the reference period (German average); the increase in this TAM is 0.4 % by mid-century, which corresponds to a fourfold increase. In the far future, the climate simulations predict a CLRD-TAM of 0.9 % (RCP4.5) and 2.0 % (RCP8.5). Here, in contrast to the near future results, there is a clear difference between the two RCP scenarios. A 2.0 % increase in mortality attributed to the influence of T_a sounds like a small amount at first, but it indicates a 20-fold increase in TAM from the reference period. The increase in TAM calculated over the entire T_a range shows that the decrease in cold days and the associated decreasing risk cannot compensate for the growing risk of increasingly warm and hot days. This is also evident when looking at the TAM, if only the T_a range below the lower threshold (cold-TAM) or only the range above the upper threshold (heat-TAM) is used for the calculation. The CLRD heat-TAM is already 5.9 % in the reference period and increases to 7.2 % in the near future and to 7.9 % or to 10.3 % in the far future (RCP4.5 resp.

RCP8.5). In contrast, the CLRD cold-TAM shows no significant change based on the RCP scenarios in Germany.

The results of IHD mortality confirm the observation of a reduction in cold-associated mortality which cannot compensate for the increase in heat-associated mortality. Here, the RR shows a weak but continuous increase in the T_a range, which is reflected by a 1.2 % increase in cold-TAM during the reference period. This cold-TAM decreases significantly by 0.1 % to 0.2 % by the middle and end of the century. The IHD heat-TAM is described with a large increase, ranging from 0.7 % to 0.8 % by mid-century and to 1.1 % and 2.4 % increase by the end of the century (RCP4.5 and RCP8.5, respectively). This implies that in the period 2068 – 2097, the mean IHD heat-TAM in Germany almost doubles and there is a 5.4 % increase in IHD mortality due to warm and hot days. Accordingly, the IHD-TAM of the entire T_a range also increases, significantly by 0.8 % to 0.9 % by the end of the century in the RCP8.5 scenario. Compared to the CLRD-TAM values, both the IHD-TAM in the reference period and the increases by the end of the century are only slightly more than half as high. This confirms the finding that CLRD mortality is more affected by heat and warmth than IHD mortality.

In the ensemble data a mean number of 13 heat wave (HW) days for the reference period (German average) is found. For the near future (2021 – 2050) a mean number of 22 – 23 heat wave days could be determined, the far future (2068 – 2097) the number of HW days increases to 31 (RCP4.5) and to 54 days (RCP8.5), respectively. The number of heat waves per year increases with the RCP8.5 scenario by 1.3 and 3.7 episodes (2021 – 2050 and 2968 – 2097, respectively), the duration of heat waves increases to 6.2 and 8.7 days, respectively, and the average intensity increases to 22.3 – 23.2 °C (RCP8.5, 2021 – 2050 and 2968 – 2097, respectively). Thus, the increase within the RCP4.5 scenario remains approximately constant between the reference period, near future, and far future, while the RCP8.5 scenario describes a more exponential increase, especially in the second half of the century.

The change of heat waves in their frequency, duration and intensity in the course of climate change shows regional differences. Thus, especially the south, the center and partly the west of Germany warms up more intense (the intensity of the heat waves increases) and the frequency of heat waves and heat wave days increases more strongly. This can be seen both in the results for the regional area averages as well as in the results of the raster data.

The characteristics of heat waves, their number, duration, and intensity, and their seasonal occurrence are relevant for estimating the health burden during and after heat waves. In particular, the duration of the heat wave can amplify mortality, and the disproportionate increase in long heat waves can therefore lead to a large increase in the number of deaths during heat waves. Thus, both RCP scenarios give an increase in CLRD mortality during long heat waves (≥ 10 days) of up to 150 % by mid-century and 260 % (RCP4.5) to a maximum 540 % (RCP8.5) increase by the end of the century. Thus, IHD mortality could be 90 % and 150 % (RCP4.5 and RCP8.5, respectively) higher in 2021 – 2050, and as much as 330 % (RCP4.5) to a maximum of 900 % (RCP8.5) higher in 2068 – 2097. The high percentages result from the change of a relatively small denominator, here the number of HW-days during long heat waves from historically 2.7 days to 27.5 days at the end of the century, calculated with an increased mortality of 13.6 % per day of a long heat wave.

Heat-related mortality and morbidity takes on a significant role with respect to climate change. Effects of climate change, such as increasing heat stress, are already affecting health in Germany. Especially people with chronic diseases of the lower respiratory tract suffer more from high temperatures and during heat waves. This highlights the importance of chronic respiratory diseases in prevention measures and education. Linking the results of the retrospective analysis

with the two RCP scenarios 4.5 and 8.5 on future climatic development in Germany shows that climate change in Germany will most likely lead to a significant increase in heat-related mortality. The results of this study therefore emphasize the need for further strengthening of climate protection measures and significant reduction of greenhouse gas emissions, so that a development as calculated in RCP8.5 scenario can be avoided.

1 Einleitung

1.1 Vorläuferstudie zu ischämischen Herzerkrankungen

In den Jahren 2012 bis 2015 wurde vom Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit das Projekt UFOPlan-Projekts „Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland“ gefördert (Zacharias und Koppe 2015). Die Biotropie des Wetters beschreibt dabei die Akkordwirkung aller, das Wetter charakterisierender meteorologischer Elemente auf den menschlichen Organismus. Ziel des Projektes war die Abschätzung der zukünftigen biotropen Belastung der Bevölkerung in Deutschland. Hierfür wurden Projektionen regionaler Klimamodelle in Hinblick auf die Veränderungen der Häufigkeit von biotropen Wetterlagen bzw. von Situationen mit raschen Wetterwechseln analysiert. Grundlage für eine solche Abschätzung war die Zusammentragung des aktuellen Wissensstandes zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit. Dieser Wissensstand wurde mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche in medizinischen Datenbanken sowie einer repräsentativen Wetterfähigkeitsbefragung des Instituts für Demoskopie (IfD) Allensbach erarbeitet.

Zahlreiche biometeorologische Studien belegen den Einfluss bestimmter Wetterlagen und Wetterelemente auf die menschliche Gesundheit. Aufbauend auf den identifizierten Zusammenhängen zwischen Wetter und Gesundheit aus der Literaturrecherche und der Wetterfähigkeitsbefragung sowie auf eigenen Abschätzungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu der Beziehung zwischen Wetterfaktoren und Mortalität für das gegenwärtige Klima, wurde der Einfluss des Klimawandels auf Basis von 19 regionalen Klimamodellen (Klimaszenario SRES-A1B) für Deutschland analysiert und die Auswirkungen der zukünftigen Entwicklung auf die Gesundheit abgeschätzt. Die Auswertung der Modellsimulationen zeigte, dass sich die zukünftige Belastung durch hohe Werte der Lufttemperatur in Deutschland bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mehr als verdoppeln wird, während die Belastung durch niedrige Temperaturwerte eher abnehmen wird. Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzeperioden werden deutlich zunehmen. Des Weiteren kommen rasche Temperaturänderungen zum Vortag und innertägliche Temperaturschwankungen, die ebenfalls mit einer erhöhten biotropen Belastung in Verbindung gebracht werden, bis Ende des Jahrhunderts häufiger vor. Biotrope Wettersituationen, die von nicht-thermischen meteorologischen Parametern dominiert sind, werden in der Mehrzahl der Fälle in Zukunft voraussichtlich häufiger auftreten. So wird für weite Regionen Deutschlands eine Zunahme von Tagen mit hohem Luftdruck, hoher Windgeschwindigkeit raschen Luftdruckanstiegen und geringer Sonnenscheindauer erwartet. Die erzielten Ergebnisse belegen die Bedeutung des Klimawandels für die Gesundheit der Bevölkerung in Deutschland und heben die Wichtigkeit von Anpassungsmaßnahmen hervor, um die Auswirkungen der erwarteten Klimaänderungen so gering wie möglich zu halten (Zacharias und Koppe 2015).

Da kardiovaskuläre Erkrankungen in besonderem Ausmaß von Wettereinflüssen betroffen sind, wurde in einer Teilprojektstudie der Einfluss der atmosphärischen Umwelt auf ischämische Herzerkrankungen, welche eine Untergruppe der kardiovaskulären Erkrankungen darstellen, für Deutschland untersucht. Dazu wurden tägliche Daten zu ischämisch bedingten (ICD-10 I20-I25) Sterbefällen und Krankenhausaufnahmen für den Zeitraum 2001-2010 vom Forschungsdatenzentrum des Bundes bereitgestellt. Die Mortalitätsdaten wurden trendbereinigt und für einen Teil der Analysen auch um den Jahresgang bereinigt. Bei den Krankenhausaufnahmen war zudem eine Entfernung des Wochengangs notwendig. Hierfür wurde eigens für diese Studie eine Methodik entwickelt, welche eine flexible Berücksichtigung des Wochengangs ermöglicht (Koppe et al. 2013a).

Für die Mortalitätsdaten wurde eine starke Abhängigkeit von der thermischen Umwelt gefunden. Die trendbereinigten Daten zeigen einen typischen v-förmigen Zusammenhang mit der thermischen Belastung. Der optimale Lufttemperaturbereich, der mit der geringsten Sterblichkeit einhergeht, liegt im Mittel zwischen 15°C und 19°C Tagesmittel der Lufttemperatur. Unterhalb und oberhalb dieses Bereiches steigt die Mortalität fast linear an. Der Anstieg unterhalb des thermischen Optimums ist im Wesentlichen durch den Jahresgang bedingt. Die Mortalitätsdaten, die zusätzlich durch den Jahresgang bereinigt wurden, zeigen kein erhöhtes Relatives Risiko unterhalb des Optimums mit Ausnahme der Todesursachen I20-I22 (v. a. Herzinfarkte) bei sehr niedrigen Tagesmittellufttemperaturwerten ($< -7^{\circ}\text{C}$). Eine Untersuchung von Hitzeperioden ergab ein um 10 % erhöhtes Risiko für die Mortalität aufgrund ischämischer Herzkrankheiten während Hitzeperioden. Für die Anzahl der Krankenhausaufnahmen konnte keine eindeutige Beziehung zu den meteorologischen Parametern ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse anderer Studien auch für Deutschland und konnten den Anstieg der Mortalität aufgrund ischämischer Herzkrankheiten an warmen und heißen Tagen deutlich belegen (Koppe et al. 2013a).

Aufbauend auf den für das gegenwärtige Klima in Deutschland identifizierten Zusammenhängen zwischen Wetterfaktoren und ischämischer Mortalität wurden anschließend die mit dem Klimawandel einhergehenden Änderungen dieser Wetterfaktoren analysiert und die Auswirkungen der zukünftigen Entwicklungen auf die ischämischen Herzkrankheiten abgeschätzt. Im Fokus der Betrachtung standen die Lufttemperatur sowie Hitzeperioden, da sich für diese Größen die stärksten Zusammenhänge zur ischämischen Mortalität ergeben hatten. Die Auswertung der Modellsimulationen zeigt, dass sich die zukünftige Belastung an Tagen mit hoher Temperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mehr als verdoppeln wird. Die Untersuchung von zukünftigen Hitzewellen bestätigt diese Erwartung. Die Belastung durch Tage mit niedriger Temperatur wird dagegen abnehmen, allerdings ist das Ausmaß dieses Rückgangs je nach Auswertemethode verschieden, weshalb eine abschließende Bewertung des Nettoeffekts der zukünftigen Temperaturentwicklung auf die ischämische Mortalität schwierig ist (Zacharias und Koppe 2014).

Es wurden neben der Lufttemperatur und Hitzewellen auch die klimawandelbedingte Veränderung von raschen Temperaturänderungen, innertäglicher Lufttemperaturschwankung, des Luftdruckes, der Windgeschwindigkeit, der Sonnenscheindauer und von biotropen Wetterlagen untersucht (Zacharias und Koppe 2015), obwohl kein Effekt der nicht-thermischen Parameter auf die IHK-Mortalität festgestellt werden konnte (Koppe et al. 2013a). Rasche Temperaturänderungen und hohe innertägliche Temperaturschwankungen werden nach (Zacharias und Koppe 2015) bis Ende des Jahrhunderts vor allem im Süden Deutschlands voraussichtlich häufiger auftreten, eine Zunahme der Tage mit hohem Luftdruck, hoher Windgeschwindigkeit und Tage mit geringer Sonnenscheindauer wurden für weite Bereiche Deutschlands gefunden. Die Analyse von biotropen Wetterklassen nach dem Biowetterklassifikationsschema des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und ihre Veränderung im Zuge des Klimawandels ergab eine leichte Abnahme der belastenden Wetterklassen gegen Ende des Jahrhunderts.

Im Folgenden wird diese Untersuchung als Vorläuferstudie bezeichnet und deren Ergebnisse mit den Erkenntnissen der vorliegenden Studie verglichen.

1.2 Motivation

Die Erkenntnisse der oben vorgestellten Untersuchung für ischämische Herzkrankheiten in Deutschland gab den Anstoß für das aktuelle, ebenfalls vom Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und nukleare Sicherheit (BMU) geförderte Projekt über den Einfluss des Wetters und des Klimawandels auf die Morbidität und Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen (2017 bis 2021).

In Deutschland haben akute respiratorische Erkrankungen und vor allem chronische Erkrankungen wie Asthma bronchiale und chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) eine hohe gesellschaftliche wie auch wirtschaftliche Bedeutung (Steppuhn et al. 2017a). Eine COPD kann sich durch langjähriges Einatmen schädlicher Substanzen wie Tabakrauch, Feinstaub und anderen Verkehrs- und Industrieabgasen entwickeln, wobei bei der Verursachung in den meisten Fällen das Konsumieren von Zigaretten eindeutig im Vordergrund steht. Die Schleimhaut in den Bronchien entwickelt zunächst eine Überempfindlichkeit und führt im späteren Verlauf durch Entzündungen zu einer irreparablen Schädigung des Lungengewebes (Rabe et al. 2007). Symptome sind chronischer Husten, Auswurf und häufige Atemnot (Steppuhn et al. 2017b).

Neben COPD zählt auch Asthma bronchiale weltweit zu den häufigsten chronischen Erkrankungen und kann in jedem Alter auftreten. Durch chronische Überempfindlichkeit gegenüber verschiedenen inhalativen Reizen und daraus resultierende Entzündungen der Atemwege sowie Verengungen der Bronchien leiden an Asthma Erkrankte unter anfallartigem Husten, pfeifenden Atemgeräuschen und Kurzatmigkeit bis hin zur akuten Atemnot (Steppuhn et al. 2017c).

Chronische Erkrankungen der unteren Atemwege sind in Deutschland eine häufige Todesursache und werden in der International Statistical Classification of Diseases (ICD-10, (WHO 2015)) den Schlüsseln J40 – J47 zugeordnet. 2015 lag die Zahl der Todesfälle mit der Ursache J40 – J47 bei 35 095, davon haben 88,5 % eine chronische obstruktive Lungenerkrankung (COPD, ICD-10-Code J44) als Haupttodesursache und ca. 3 % Asthma bronchiale (ICD-10-Codes J45 – J46) (Destatis 2017). Aufgeteilt nach Geschlecht lagen die Ursachen J40 – J47 in der weiblichen Bevölkerung 2013 an achter Stelle der häufigsten Todesursachen (3,2 % aller Sterbefälle), in der männlichen sogar an vierter Stelle (4,2 % aller Sterbefälle) hinter ischämischen Herzerkrankungen (ICD-10-Codes I20 – I25), Lungenkrebs und zerebrovaskulären Erkrankungen wie z. B. Schlaganfälle. Ischämische Herzerkrankungen, wozu hauptsächlich Angina Pectoris und Myokardinfarkte zählen, sind bei beiden Geschlechtern die häufigste Todesursache (13 - 15 % aller Sterbefälle) (RKI und Destatis 2015).

Die Bedeutung der chronischen Atemwegserkrankungen ist in Deutschland, auf Basis der Mortalitätszahlen, deutlich geringer als die von ischämischen Herzerkrankungen. Im Jahr 2015 kam es zu 128 230 Todesfällen mit den Ursachen I20 – I25, das ist das ca. 2,7-fache der Todesfälle mit den Ursachen J40 – J47. Während aber in der Dekade 2005 bis 2015 die Mortalität ischämischer Herzerkrankungen um ca. 14 % abgenommen hat, nahmen die Todesfälle aufgrund chronischer Erkrankungen der unteren Atemwege um ca. 36 % zu (Destatis 2007, 2017). Die Zunahme betrifft mit 44 % Frauen stärker als Männer (30 % Zunahme) auch wenn die absolute Zahl in der männlichen Bevölkerung weiterhin höher liegt. Dies führt zu einer zunehmenden Bedeutung der chronischen Atemwegserkrankungen in Deutschland, vor allem der Erkrankungen COPD (J44), die hauptsächlich für die Zunahme verantwortlich ist. Todesfälle aufgrund von Asthma bronchiale (J45) sind in der genannten Dekade jedoch um 37 % bzw. 52 % gesunken (weibliche bzw. männliche Bevölkerung). Nicht nur bei der Mortalität, auch bei Krankenhauseinweisungen und ambulanten Behandlungen (Morbidität) spielen akute und chronische Erkrankungen der Atemwege eine wichtige Rolle (Steppuhn et al. 2017a).

Neben den großen Krankheitsgruppen der Atemwege und des Herzens spielen auch psychische Erkrankungen und Verhaltensstörungen eine wichtige Rolle in Deutschland, was sich hauptsächlich anhand von Arztbesuchen und Arbeitsunfähigkeitsbescheinigungen manifestiert und weniger an Krankenhausaufenthalten oder die Mortalität betreffend. Psychische Störungen liegen mit 16,6 % aller Arbeitsunfähigkeitstage (AU-Tage) nach Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems an zweiter Stelle der Ursachen für AU-Tage, Atemwegserkrankungen liegen mit 14,8 % an dritter Stelle (Knieps und Pfaff 2018). AU-Tage aufgrund von psychischen Störungen haben sich in der Dekade 2007 bis 2017 mehr als verdoppelt und nehmen die längste Falldauer ein. Innerhalb

der psychischen Erkrankungen sind depressive Störungen (ICD-10-Code F32 – F33) die Hauptursache für Fehltage durch Arbeitsunfähigkeit. Reaktionen auf Belastungs- und Angststörungen (ICD-10-Code F43) sind jedoch nach Fallzahlen und nicht nach Anzahl der AU-Tage die Hauptursache für AU-Fälle, weisen aber eine deutlich geringere Falldauer auf. Somatoforme Störungen (ICD-10-Code F45) stehen an fünfter Stelle der AU-Fälle, Störungen durch Alkohol (ICD-10-Code F10) an siebter Stelle (Knieps und Pfaff 2018). Nahezu gleichgeblieben ist die Zahl der Suizide (Vorsätzliche Selbstbeschädigung, ICD-10-Code X60 – X84) in Deutschland und liegt bei ca. 10 000 Fällen (ca. 7 400 Männer, 2 600 Frauen) (Destatis 2017).

Zahlreiche Studien aus dem biometeorologischen, medizinischen oder epidemiologischen Bereich untersuchen und belegen einen Zusammenhang zwischen Wetter und Gesundheit. Dabei werden sowohl der tägliche Einfluss bestimmter meteorologischer Parameter als auch das gehäufte Auftreten bestimmter Krankheitsbilder während der verschiedenen Jahreszeiten untersucht.

Korrelationen zwischen den Einflussgrößen und der Gesundheit konnten statistisch signifikante Zusammenhänge von Jahreszeiten, Wetterlagen und einzelnen meteorologischen Parametern mit Atemwegs- Herzkreislauf- und psychischen Erkrankungen sowie mit der allgemeinen subjektiven Stimmung und dem Wohlbefinden belegen. Grundlage der Wirkung des Wetters ist die Reaktion des Körpers auf seine Umgebung. Verlassen beispielsweise die thermischen Bedingungen den für den Körper idealen Bereich, reagiert er mit thermophysiological Anpassungen wie Schwitzen, Kältezittern und anderen Anpassungen im Stoffwechsel- oder Hormonbereich. Die notwendige Anpassungsleistung belastet den Körper; diese Belastung wird von gesunden Menschen aber in der Regel gut verkraftet. Ist der Organismus jedoch durch eine Krankheit geschwächt oder ist die Thermoregulation eingeschränkt, dann können sich bestehende Krankheitssymptome verstärken (Faust et al. 1978; Promet 2007).

Der Einfluss des Wetters ist jedoch nicht auf die thermischen Bedingungen beschränkt. Auch Luftdruckänderungen, Änderungen in der Luftfeuchte, der Strahlung und des Niederschlags beeinflussen den Organismus. Bei Änderungen der Wetterlage kommt es zu dem Zusammenspiel dieser Faktoren, da sich zahlreiche meteorologische Parameter gleichzeitig verändern. Der Einfluss des Wetters ist auch nicht auf die Außenwelt beschränkt, auch in Innenräumen kann er sich bemerkbar machen z. B. durch Luftdruckänderungen oder das geringere Tageslicht aufgrund von Bewölkung oder Regen. Viele Menschen sind sich des Einflusses des Wetters bewusst; nach einer Studie von Höppe et al. (2002) bezeichnen sich ca. 50 % der Menschen in Deutschland als wetterfühlig, ein Wert, der auch in der Vorläuferstudie bestätigt wurde (Koppe et al. 2013b). Dabei ist nicht gemeint, dass das Wetter direkt Krankheiten verursacht. Vielmehr kann es einerseits das subjektive Wohlbefinden und die individuelle Stimmung beeinflussen und andererseits zu einer Verschlechterung von bereits bestehenden Symptomen geschwächter Personen führen.

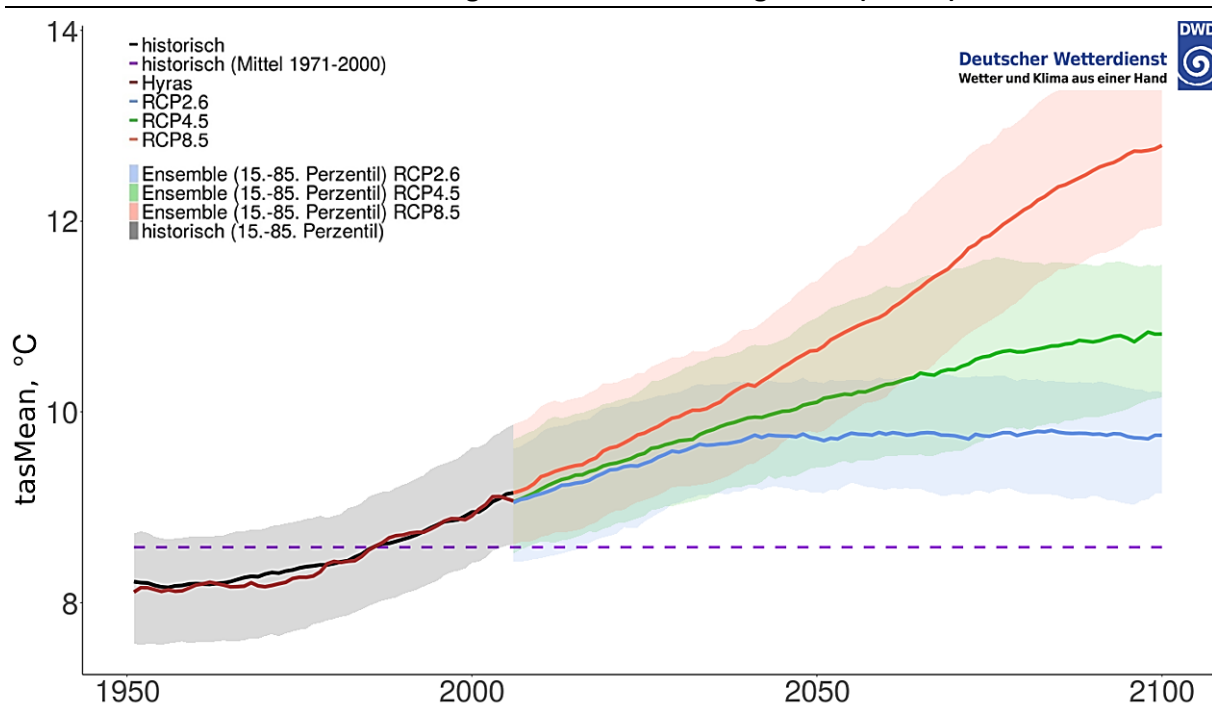
Nicht nur die alltäglichen Wetterbedingungen haben einen Effekt auf die Gesundheit, stärker wirken sich Extremereignisse wie beispielsweise eine Hitzewelle aus (Mora et al. 2017). Während längerer Hitzeperioden kommt es regelmäßig zu deutlichen Zunahmen der Krankheits- und Todesfälle (z. B. Robine et al. 2008; Muthers et al. 2017).

Im Rahmen des Klimawandels wird das gesundheitliche Risiko aufgrund von Hitze immer mehr an Bedeutung gewinnen. Nach dem fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) aus dem Jahr 2013 wird die Zunahme der globalen Durchschnittslufttemperatur um 0,9 bis 5,4 K betragen, abhängig von den unterschiedlichen Klimaschutzszenarien und Klimamodellen. Die Zunahme nicht nur der Anzahl der Hitzeperioden, sondern auch ihre Intensität und Dauer ist sehr wahrscheinlich (IPCC 2013). Aktuelle Abschät-

zungen für Deutschland geben einen möglichen Anstieg der mittleren Lufttemperatur im Sommer von 3,4 K bis 4,3 K (von Küstengebieten bis zu den Gebirgen) bis Ende des Jahrhunderts an (im pessimistischen Fall, bezogen auf 1971 – 2000) (Kahlenborn et al. 2021). Neue Bewertungen der Klimarisiken für Deutschland zeigt, dass im Bereich der menschlichen Gesundheit bereits für die Gegenwart (1971 – 2000) das Risiko durch Hitzebelastung als „hoch“ eingeschätzt wird, die Gefahr durch UV-Strahlung, durch Luftverunreinigungen und die Belastung des Gesundheitssystems als „mittleres“ Risiko. Am Ende des Jahrhunderts könnten all diese und weitere gesundheitlich relevante Bereiche ein hohes Risiko darstellen (pessimistischer Fall) (Kahlenborn et al. 2021).

Um das zukünftige gesundheitliche Risiko von Hitzeperioden abzuschätzen, wird mittels aktueller Simulationen regionaler Klimamodelle die Zunahme der durchschnittlichen sowie täglichen Lufttemperatur und von Hitzeperioden modelliert. Die Simulationen basieren auf den RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) des IPCC RCP4.5 (moderates Klimaschutzenszenario) und RCP8.5 (das sogenannte „weiter-wie-bisher“ oder pessimistisches Szenario) (Abbildung 1). Das sehr optimistische RCP2.6-Szenario (starker Klimaschutz) wird in der Untersuchung als wenig realistisch eingeschätzt und daher nicht berücksichtigt (z. B. Brienens et al. 2020; Yamagata et al. 2018).

Abbildung 1: Entwicklung der Jahresmittellufttemperatur in Deutschland von 1950 bis 2100 dargestellt mit verschiedenen Ensemble-Daten im historischen Verlauf und für drei RCP-Szenarien ab 2015 verglichen mit Beobachtungsdaten (HYRAS).



Abkürzungen: tasMean, Jahresmittellufttemperatur; RCP, Repräsentative Konzentrationspfad. Quelle: Brienens et al. (2020)

1.3 Zielsetzung

Das Wetter ist kein Hauptrisikofaktor für eine Erkrankung, sondern trägt nur einen gewissen Anteil zum Auftreten von Symptomen einer Krankheit bei. Wie groß dieser Anteil ist, ist jedoch individuell verschieden. Der menschliche Organismus ist ein sehr komplexes System, welches in sehr verschiedener Weise auf Umwelteinflüsse reagieren kann. Gleichzeitig verändern sich in

der Umwelt immer mehrere Faktoren simultan, deren Einfluss auf den Körper sich nicht immer trennen lässt.

Die zunehmende Bedeutung der Atemwegserkrankungen in Deutschland und die durch den demographischen Wandel ansteigende Zahl älterer Menschen legte eine Untersuchung weiterer Risikofaktoren der Mortalität und Morbidität nahe. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, meteorologische und lufthygienische Einflussfaktoren auf Atemwegserkrankungen zu identifizieren. Dabei wurden Mortalitäts- und Morbiditätsdaten von Deutschland aus den Jahren 2001 – 2015 genutzt, die durch ihre räumliche Auflösung eine Untersuchung regionaler Unterschiede ermöglichen. Die Analyse von Morbiditätsdaten von psychischen und Verhaltensstörungen wurde mit aufgenommen, da hier im Gegensatz zu den Atemwegs- und Herzerkrankungen keine Veränderung der Häufigkeiten der Krankenhausaufnahmen mit dem Wettergeschehen angenommen wurde – diese diente demnach als eine Art Kontrollgröße. Ein weiterer Aspekt war die Untersuchung des Einflusses von Wetter und Klima auf ischämische Herzerkrankungen, aufbauend auf den Ergebnissen der Vorläuferstudie mit einem verlängerten Zeitraum der Mortalitäts- und Morbiditätsdaten und neuen Klimaprojektionen basierend auf den neuen RCP-Szenarien. Der Vergleich der Ergebnisse mit denen der Vorläuferstudie war ein weiteres Ziel.

Die zukünftige gesundheitliche Belastung aufgrund der sich verändernden thermischen Bedingungen wurden unter der Annahme gleichbleibender statistischer Zusammenhänge zwischen Wetter und der Mortalität abgeschätzt. Eine mögliche Anpassung des Menschen an die sich verändernden klimatischen Bedingungen werden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Abschätzung einer langfristigen Anpassung und der Wirkung verschiedener Anpassungsmechanismen ist Gegenstand aktueller Forschung, es liegen noch keine verlässlichen Informationen vor.

Berücksichtigt werden hingegen die Unsicherheiten in der klimawandel-bedingten Entwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Der Vergleich der beiden RCP-Szenarien ermöglicht eine Abschätzung der Bandbreite zukünftiger Entwicklungen des Klimas. Die Ensembledaten der Simulationen regionaler Klimamodelle bis Ende des 21. Jahrhunderts zeigen die Unsicherheiten aufgrund unterschiedlicher Klimamodelle auf.

Im vorliegenden Bericht werden gesundheitliche Folgen von Naturkatastrophen wie Hurrikans, Überflutungen, Erdbeben und längeren Dürreperioden nicht untersucht. Die Auswirkungen solcher Ereignisse sind in ihrer Tragweite mit posttraumatischen Belastungsstörungen, Unsicherheiten in der Lebensmittelversorgung und der Ausbreitung von Infektionskrankheiten über verunreinigtes Trinkwasser von den üblichen täglichen Wettereinflüssen zu unterscheiden. Hitzewellen werden jedoch berücksichtigt, da diese einen großflächigen und direkten Einfluss auf die Bevölkerungsgesundheit haben, und wie sich gezeigt hat, bereits häufiger in Deutschland auftreten und relevant für das Gesundheitssystem sind.

Die Untersuchung biotroper Wetterklassen in Bezug auf die biotrope Belastung aus der Vorläuferstudie wird im aktuellen Projekt nicht wiederholt. Die Analyse stellt sich als schwierig heraus, da für eine angemessene Anwendung des Biowetterklassifikationsschemas die verwendeten regionalen Klimamodelldaten nicht die notwendige zeitliche und räumliche Auflösung bieten. Es werden in Bezug auf die Mortalität und Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen keine weiterführenden Erkenntnisse auf Basis der Biowetterklassen-Analyse erwartet.

1.4 Aufbau des Berichts

Der vorliegende Bericht ist wie folgt aufgebaut: in Kapitel 2 werden zunächst die systematische Literaturrecherche und der aktuelle Wissensstand über den Zusammenhang des Wetters auf Atemwegserkrankungen, psychische Störungen und Suizide sowie ischämische Herzerkrankun-

gen beschrieben. In Kapitel 3 folgt die Beschreibung der verwendeten Mortalitäts- und Morbiditätsdaten, der meteorologischen und lufthygienischen Daten sowie der Klimaszenarien. Die angewandten Methoden für die Auswertegrößen und der Klimasimulationen wird in Kapitel 4 dargestellt.

Im Mittelpunkt steht das Ergebniskapitel (Kapitel 5). Dieses ist wie folgt untergliedert: Zunächst wird der Gesamteffekt der thermischen Umwelt auf die Mortalität (chronische untere Atemwegserkrankungen und ischämische Herzerkrankungen) beschrieben, wobei zuerst die Ergebnisse der retrospektiven Analyse und darauf aufbauend die Erkenntnisse zum prospektiven Einfluss des Klimawandels aufgeführt sind. Darauf folgt die Beschreibung der retrospektiven Ergebnisse der Morbiditätsdaten und der Suizide. Die Beschreibung der Hitzeperioden und ihre Auswirkungen auf die Mortalität sowohl retrospektiv als auch die Veränderung im Zuge des zukünftigen Klimawandels ist in Kapitel 5.2 zu finden. Die Ergebnisse einer retrospektiven Analyse über die Auswirkungen der Pollenbelastung auf die Morbidität aufgrund von Asthma folgt in Kapitel 5.3.

In der Diskussion (Kapitel 6) werden Methodik und Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln in ähnlicher Reihenfolge aufgegriffen und die aktuelle sowie zukünftige gesundheitliche Belastung durch Wetter und Klima diskutiert. Der Bericht endet mit den Schlussfolgerungen (Kapitel 7).

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche wurde in verschiedenen medizinischen und Umweltdatenbanken durchgeführt. Dazu zählt der medizinische Publikationsserver PubMed und die Datenbank des Robert-Koch-Institutes (RKI), die wissenschaftlichen Online-Datenbanken ScienceDirect und Web of Science, die Dokumentationsstelle Luftverschmutzung und Gesundheit (LUDOK) des Schweizer Tropen- und Public Health-Institutes und die Umweltdatenbanken des Umweltbundesamtes (UBA) OPAC/UFORDAT.

Da der überwiegende Teil der Publikationen und der oben genannten Datenbanken englischsprachig ist, wurden englische Stichworte verwendet. Die deutschsprachigen Datenbanken des RKI und des UBA wurden jeweils mit den entsprechenden deutschen Begriffen durchsucht. Weitere Filter für die Recherche waren der Zeitraum von 2001 bis 2018 und eine Beschränkung auf Studien, die den Einfluss auf den Menschen untersuchen.

Aufbauend auf der Vorläuferstudie „Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland“ von Zacharias und Koppe (2015), in Zuge dessen eine ausführliche Literaturrecherche über den Zusammenhang zwischen dem Wetter und dem Auftreten von ischämischen Herzerkrankungen für die Jahre 2001 bis 2012 durchgeführt wurde (Koppe et al. 2013a), wurde hier auf eine neue ausführliche systematische Literaturrecherche zu diesem Thema verzichtet. Als Ergänzung und zur Aktualisierung der Erkenntnisse wurden vor allen Review-Artikel der Jahre 2013 bis 2018 recherchiert und zusammengefasst (Kapitel 2.3.2).

Diese Literaturstudie beschreibt den Stand der Forschung der letzten ca. 17 Jahre. Die ausgewählten Studien unterscheiden sich in ihrem Untersuchungsansatz und -ziel, im Studiendesign, der Länge und Qualität der Datenreihen. Dennoch wurden Ergebnisse unterschiedlicher Studien zusammengefasst, um Aussagen über eine Belastbarkeit der Ergebnisse zu erzielen. Relevante Unterschiede wurden in den Tabellen und im Text vermerkt. Die Verteilung beispielsweise der Studiendesigns zeigt jedoch, dass die Mehrzahl ein ökologisches Design und damit einen vergleichbaren Studienverlauf verwendet.

Für die Suche nach Beiträgen zum Einfluss des Wetters und Klimas auf **Atemwegserkrankungen** wurden Stichworte ausgewählt, die eine Kombination aus meteorologischen und medizinischen Begriffen darstellen:

("weather" OR "climate" OR "climatic" OR "meteorology" OR "meteorological" OR "biometeorology" OR "biometeorological" OR "air temperature" OR "atmospheric temperature" OR "ambient temperature" OR "outdoor temperature" OR "atmospheric pressure" OR "barometric pressure" OR "humidity" OR "pollen" OR "Air Pollution")

AND

("asthma" OR "COPD" OR "bronchitis" OR "respiratory disease")

Die Anzahl der Treffer in den Online-Datenbanken PubMed, ScienceDirect und Web of Science lag bei ca. 9 000 Publikationen, die Datenbank des Umweltbundesamtes ergaben 17 Treffer und LUDOK ca. 300 Treffer. Die Datenbank des Robert-Koch-Institutes ergab keine neuen relevanten Treffer mehr, was z.T. an einem fehlenden meteorologischen Bezug der dort gelisteten Publikationen liegt.

Für eine Vorauswahl wurden die Zusammenfassungen der Artikel nach den Stichworten durchsucht und eine vorläufige Relevanz festgestellt. Mit dem Einbeziehen weiterer Artikel aus den Referenzangaben ergaben sich ca. 500 Publikationen, die in die eigene Bibliothek übernommen wurden. Nach der Vorauswahl folgte eine Prüfung auf thematische Relevanz, welche unter anderem zum Ausschluss von 91 Artikeln führte, die den Einfluss von Luftbeimengungen auf die Gesundheit ohne meteorologischen Bezug untersuchten, und weiteren 30 Studien zur Wirkung von Pollen ohne nähere meteorologische Untersuchung. Ungefähr 100 Review-Artikel wurden ebenfalls ausgeschlossen.

Nach der thematischen Relevanz wurde die klimatische Relevanz untersucht: das bedeutet, dass nur Studien ausgewählt wurden, deren Untersuchung in einer, zum europäischen Klima passenden Umgebung durchgeführt wurden. Dies führte zum Ausschluss von 74 Studien aus dem asiatischen Raum, hauptsächlich aus China, Taiwan und Korea, vier Studien aus afrikanischen Ländern und weiteren 14 Publikationen aus der Türkei, dem Iran, Kuwait, Saudi-Arabien, Zypern und dem Westen von Texas, USA. Für die Meta-Analyse verblieben damit 169 Studien aus europäischen Ländern, den USA, Australien und Neuseeland.

Eine Übersicht der behandelten Krankheitsbilder zeigt, dass die Mehrzahl der Studien (44%) Atemwegserkrankungen ohne eine Unterscheidung einzelner Krankheitsbilder untersuchen. Krankheiten der unteren Atemwege werden häufiger untersucht als die der oberen Atemwege. Zu den unteren Atemwegserkrankungen zählen u.a. Asthma, die Chronisch Obstruktive Lungenerkrankung (COPD) und chronische Bronchitis aber auch die meist durch Infektion hervorgerufene Lungenentzündung und Bronchiolitis. Krankheiten der oberen Atemwege sind meist akut und infektiös- oder allergiebedingt. Die verwendeten Gesundheitsdaten der Studien sind überwiegend Morbiditätsdaten. Dazu zählen sowohl Krankenhaus-Einlieferungen (36 %), Notaufnahme-Besuche, Notfälle mit einem Rettungswagen und allgemeine Arztbesuche, als auch selbst-dokumentierte Symptome (meist in Umfragen erhoben), Tests auf Virus-Aktivität, Allergietests und die Lebensqualität Erkrankter. Mortalitätsdaten wurden in 24 % der Studien verwendet.

Die überwiegende Mehrzahl der Studien hat ein ökologisches Studiendesign, nur wenige Studien verwenden Methoden einer Querschnittserhebung, haben langfristige Daten aus einer Kohortenstudie oder verwenden eine Kontrollgruppe für die Auswertung. Weitere 23 Studien haben das „case cross-over“ Studiendesign verwendet und drei experimentelle Studien (Tests in Klimakammern) sind in der Auswahl dabei.

Für die Suche nach Beiträgen zum Einfluss des Wetters und Klimas auf **Störungen der Psyche und des Verhaltens** wurden Stichworte ausgewählt, die eine Kombination aus meteorologischen und medizinischen Begriffen darstellen:

("weather" OR "climate" OR "climatic" OR "meteorology" OR "meteorological" OR "biometeorology" OR "biometeorological" OR "air temperature" OR "atmospheric temperature" OR "ambient temperature" OR "outdoor temperature" OR "atmospheric pressure" OR "barometric pressure" OR "humidity" OR "pollen" OR "air pollution")

AND

("bipolar" OR "suicide" OR "anxiety" OR "sleep" OR "depression" OR "depressive" OR "mental" OR "psychiatric" OR "mood")

In der umfangreichsten Datenbank, PubMed, ergaben sich 1 961 Treffer, in deren Titel oder Kurzfassungen die genannten Stichworte auftreten, bei ScienceDirect erfolgten ähnlich viele Treffer, mit dem Ausschluss folgender, nicht erwünschter Stickwort-Kombinationen konnte die Anzahl nichtzutreffender Titel etwas reduziert werden:

NOT “learning climate” NOT “working climate” NOT “school climate” NOT “clinic climate” NOT “safety climate” NOT “emotional climate”

In der Datenbank “Web of Science“ ließen sich 264 passende Titel finden, bei Ludok konnten für die medizinischen Begriffe „depression“ 14 Treffer, „anxiety“ drei Treffer und sieben Treffer für „suicide“ gefunden werden. Diese stehen im Zusammenhang zu Luftbeimengungen wie Stickstoffdioxide (NO₂), Feinstaub (PM10 und PM2,5) und Ozon (O₃). In den Datenbanken des RKI und des UBA ergaben sich nur wenige passende Treffer.

Mit dem gleichen Verfahren wie bei den Studien zu den Atemwegserkrankungen erfolgte zunächst eine Vorauswahl der Studien, die in die eigene Bibliothek übernommen wurden. Zusammen mit weiteren Studien aus den Referenzangaben ergaben sich 232 Publikationen zum Thema. Danach erfolgte die Überprüfung der thematischen Relevanz, was zum Ausschluss von ca. 60 Studien führte. Gründe für den Ausschluss waren unter anderem die Untersuchung von Naturkatastrophen wie Hurrikans, große Überschwemmungen in Mittelamerika oder längere Dürreperioden in Australien. Auch zu kleine Fallzahlen (< 10 Erkrankte), ein zu kurzer Zeitraum bei Aussagen über die Saisonalität (≤ 1 Jahr) oder behandelte Krankheitsbilder, die nicht zum Thema dieser Studie passten (z. B. Schlafapnoe, Erkrankung des Nervensystems). Weitere 15 Review-Paper wurden aufgrund fehlender eigener Ergebnisse aussortiert. Die Sortierung nach klimatischer Relevanz schloss weitere ca. 50 Publikationen aus dem asiatischen Raum aus, weitere elf aus der Türkei, Ägypten, Israel und Iran, und acht Studien aus Südamerika. Nach der Auswahl verblieben 100 Studien über den Zusammenhang von Wetter und Klima mit Störungen der Psyche und des Verhaltens. Diese Studien verwenden zum größten Teil Daten aus den USA (16%), es folgen Australien und Kanada, aus Deutschland kommen sechs der ausgewählten Studien. In den letzten 18 Jahren sind langsam aber stetig mehr Studien zu diesem Thema erschienen. Besonders seit 2012 wurden vermehrt Studien publiziert.

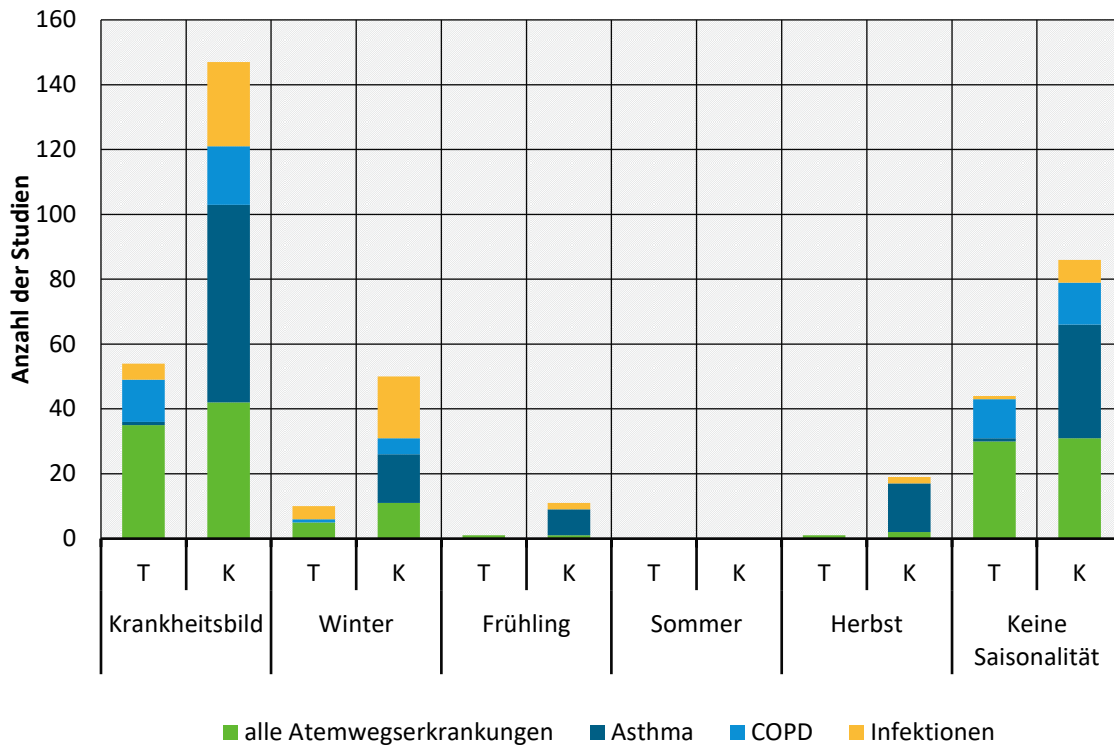
2.2 Zusammenhang zwischen Wetter und Atemwegserkrankungen

2.2.1 Saisonale Schwankungen

Viele der epidemiologischen Studien (45 %) haben einen jahreszeitlichen Rhythmus von Mortalität und Morbidität festgestellt. Dieser zeigt, dass eine deutliche Mehrheit der Erkrankungen im Winter auftritt (62 % der Studien zeigen ein Winter-Maximum); keine der Studien verweist auf eine erhöhte Anfälligkeit im Sommer (Abbildung 2 und Abbildung A 1). Vor allem die Mortalität ist im Winter erhöht; alle Mortalitätsstudien, die eine Saisonalität angeben, verweisen auf das Maximum im Winter. In Moskau (Russland) erstreckt sich die kältebedingte Mortalität bereits ab Herbst durch den Winter bis in den Frühling hinein (Revich und Shaposhnikov 2008). Röcklöv et al. (2009) zeigt eine Abhängigkeit der Sommermortalität in Schweden von der Mortalitätsrate im vorherigen Winter; ist diese hoch, verringern sich die hitzebedingte Sterbefälle im Sommer. Bei den Morbiditätsstudien zeigt ebenfalls die Mehrheit eine hohe Winter-Erkrankungsrate, aber auch im Frühling und Herbst sind (lokale) Maxima zu erkennen (Abbildung 2).

Die Betrachtung der Studien sortiert nach den häufigsten Krankheitsbildern zeigt ebenfalls einen jahreszeitlichen Rhythmus (Abbildung 2). Infektionsbedingte Atemwegserkrankungen wie Influenza und die häufig RSV-bedingte Bronchiolitis haben den stärksten Wintereffekt, was durch Vorkommen und Verbreitung der Viren bedingt ist (Donaldson 2006). Nur wenige Studien geben ein erhöhtes Vorkommen von Infektionen im Frühling und Herbst an. Die steigende Erkrankungsrate im Herbst wird von Asthma-Anfällen geprägt und liegt mit 15 Studien bei der gleichen Anzahl wie die Angabe für den Winter. Von den Studien, die eine erhöhte Asthma-Anfälligkeit im Herbst aufzeigen, haben zwölf davon nur Kinder als Untersuchungsgruppe.

Abbildung 2: Studien (2001 – 2018) zur Saisonalität von Atemwegserkrankungen, Asthma, COPD und Atemwegsinfektionen, angegeben als sign. erhöhte Mortalität/Morbidität im Vergleich zum Gesamtjahr.



Erläuterungen: T, Todesfall (Mortalität); K, krank (Morbidität). Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Die Häufung von Asthma-Anfällen bei Kindern im Herbst wird in mehreren Untersuchungen auf den Schulbeginn im September bezogen (Johnston et al. 2006; Lee et al. 2012). Asthma-Ver-schlechterungen sind aber auch im Frühling zu beobachten (Soyiri et al. 2013; Hervás et al. 2015; Mazenq et al. 2017a). Studien zu COPD machen oft keine Angabe zur Saisonalität, sechs geben eine steigende Mortalität (Zeka et al. 2014) und Morbidität im Winter an (Donaldson et al. 2012; Santus et al. 2012; Brzezinska-Pawlowska et al. 2016).

Erwachsene Erkrankte wurden im Winter am häufigsten asthmabedingt in einem Krankenhaus aufgenommen, während Kinder unter 18 Jahren ein Maximum im Herbst aufweisen (Abbildung A 1). In einer umfangreichen Studie über Asthma- und Bronchitis-bedingte Krankenhauseinweisungen von Kindern (0 – 14 Jahre alt) stellt Priftis et al. (2006) fest, dass im Herbst ein sprunghafter Anstieg der Krankenhauseinweisungen erfolgt und die Zahlen bis in den Frühling erhöht bleiben. Eine Altersunterscheidung zeigt vor allem bei den Kleinkindern bis vier Jahre das Maximum im Herbst und im Winter, während bei älteren Kindern zwischen fünf und vierzehn Jahre ein Maximum im Mai auftritt. Lee et al. (2012) stellt für den US-Bundesstaat New York ebenfalls eine saisonale Verschiebung aufgrund des Alters fest. Zusammen mit weiteren Studien (Villeneuve et al. 2005; Wasilevich et al. 2012; Youssef-Agha et al. 2012) ist es auffällig, dass Atemwegserkrankungen bei Kindern hauptsächlich im Herbst auftreten, während Erwachsene und Ältere häufiger im Winter erkranken. Auch im Frühling ist der Anteil erkrankter Kinder höher als der bei Erwachsenen oder älteren Menschen. Jahreszeitlichen Faktoren wie die Pollensaison könnten eine Erklärung für den Anstieg der Erkrankungen im Frühling sein (Tosca et al. 2014). Bei Studien zu älteren Erkrankten wurde insgesamt seltener die Saisonalität untersucht; wenn, dann tritt die Erkrankung auch überwiegend im Winter ein.

Da die Saisonalität von Atemwegserkrankungen häufig als bekannt vorausgesetzt wird, wird diese wiederholt aus Studien herausgerechnet, um kurzfristige Effekte zu untersuchen und andere, nicht-meteorologische Einflussfaktoren auszuschließen (Ishigami et al. 2008; Alessandrini et al. 2011; Breitner et al. 2014). Auch die Wahl eines „case cross-over“ Studiendesigns, bei dem jeder Fall mit Krankheits- und Nicht-Krankheitstagen mit sich selbst kontrolliert wird, dient in der Epidemiologie der Kontrolle lang- und mittelfristiger Trends wie der Saisonalität (Jaakkola 2003; Lombardi 2010; Wasilevich et al. 2012). Von den relevanten Studien verwenden 23 dieses spezielle Studiendesign (z. B. Stafoggia et al. 2008; Buckley und Richardson 2012).

2.2.2 Temperatureffekte

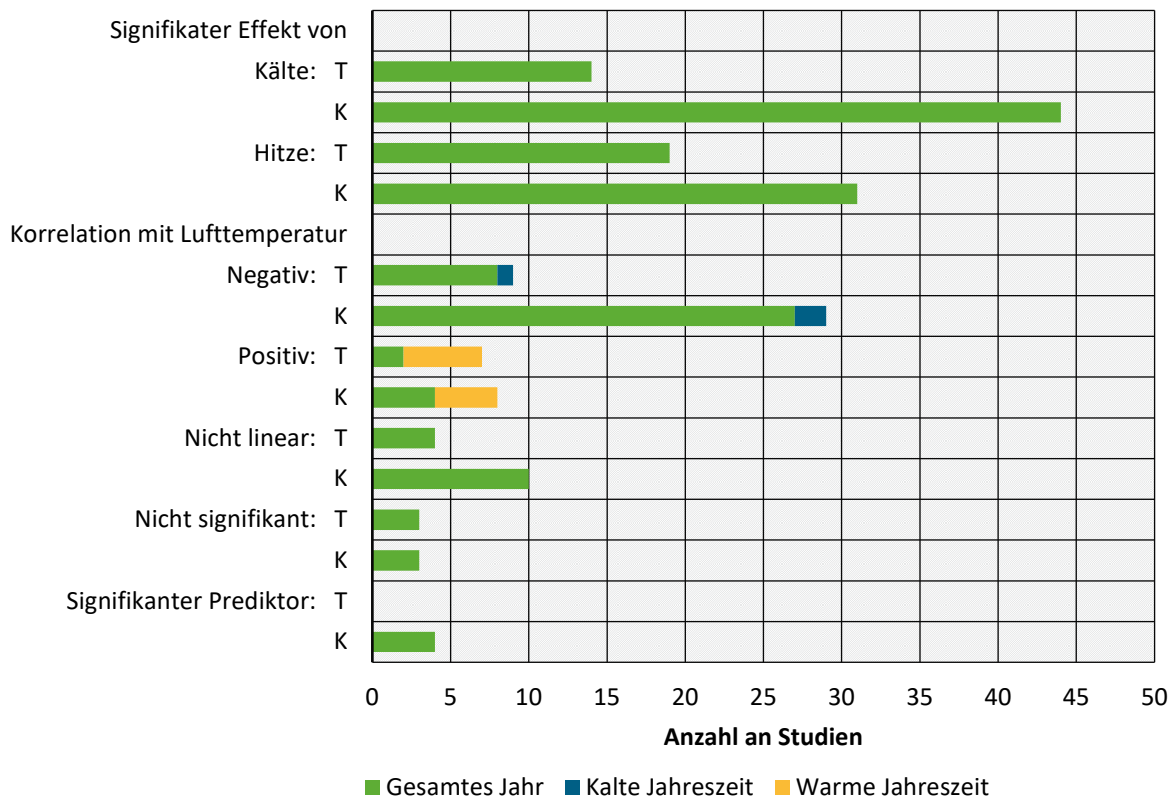
Die beobachteten jahreszeitlichen Schwankungen von Mortalität und Morbidität bei Atemwegserkrankungen legen den Schluss nahe, dass ein Zusammenhang mit der Lufttemperatur besteht. Die Winterübersterblichkeit und das generelle Minimum im Sommer verweisen auf einen negativen Einfluss von Kälte, aber auch hohe Temperaturwerte können sich als schädlich erweisen (Sherbakov et al. 2018).

Es werden verschiedene Ansätze verwendet, um den Einfluss von Kälte oder Wärme auf den Menschen zu untersuchen. Die Korrelation von Lufttemperaturdaten mit täglichen Gesundheitsdaten ist eine vielfach verwendete Methode, bei der aber auf den Einfluss von langfristigen Trends, zeitlichen Variationen der Saison und des Wochentages, Grippewellen im Winter und andere Störeinflüsse geachtet werden sollte. Eine positive (direkte) Korrelation bedeutet dabei, dass die Korrelation ein positives Vorzeichen hat, also beide Parameter in die gleiche Richtung verlaufen: z. B. steigt die Temperatur, steigt auch die Mortalität. Eine negative (inverse) Korrelation bedeutet, dass ein Parameter invers zum anderen verläuft: sinkt die Temperatur, dann steigt gleichzeitig die Mortalität an. Die Verwendung nicht nur von täglichen Mittelwerten der Lufttemperatur, sondern auch ein Tagesminimum, -maximum, die innertägliche Temperaturschwankung oder die Änderung zum Vortag ist möglich, um die thermische Belastung besser zu erfassen (Priftis et al. 2006; Lin et al. 2012b). Dafür kann auch ein biometeorologischer Parameter herangezogen werden, der neben der Lufttemperatur auch Luftfeuchte, Strahlung und den Einfluss von Wind mitberücksichtigt. Die Kombination aus Lufttemperatur und -feuchte ist der am häufigsten verwendete zusammengesetzte Parameter (apparent temperature, AT) (Analitis et al. 2008; Baccini et al. 2008). Die Analysen zeigen aber, dass die verschiedenen Temperaturvariablen meist keinen signifikanten Unterschied für die Auswertung des Effektes machen (Lin et al. 2012b; Almeida et al. 2013).

Viele Studien geben sowohl Kälte als auch Hitze als belastend für die Atemwege an und nennen signifikante negative und positive Korrelationen oder jeweils erhöhte Risiken mit der täglichen Lufttemperatur (Abbildung 3). Unter dem Begriff „Hitze“ und „Kälte“ sind hier Aussagen von Studien zusammengefasst, die ein erhöhtes relatives Risiko oder eine signifikante Korrelation mit der Lufttemperatur über oder unter einem spezifischen regionalen Grenzwert oder Perzentil (z. B. 95. Perzentil oder 1. Perzentil) angeben.

Zahlreiche Studien haben einen V-, J- oder U-förmigen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Gesundheit festgestellt (Laaidi et al. 2006; Fernandez-Raga et al. 2010). Bei niedrigeren und höheren Temperaturwerten steigt die Mortalität und Morbidität jeweils an, dazwischen liegt ein optimaler Temperaturbereich. Dieser Bereich kann je nach klimatischer Region, Untersuchungsgruppe und Krankheitsbild variieren (Tabelle 1). Die angegebenen optimalen Temperaturbereiche schwanken zwischen 18 °C (in Russland und der Kastilien-Hochebene in Zentralspanien) und 25 °C (in Italien und Frankreich). Ishigami et al. (2008) vergleicht die europäischen Städte Budapest, London und Mailand miteinander und nennt Temperaturoptima von 20 °C in London über 24 °C in Budapest bis 26 °C in Mailand.

Abbildung 3: Studien (2001 – 2018) mit Angabe eines statistisch signifikanten Effekts von Kälte oder Hitze sowie der Zusammenhang mit ansteigender oder fallender Lufttemperatur auf die Mortalität oder Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen.



Erläuterungen: T, Todesfall (Mortalität); K, krank (Morbidität). Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle 1: Studien mit Angabe eines thermischen Bereiches mit reduzierter Mortalität/Morbidität oder Angabe zu Schwellenwerten des Kälte- oder Wärmebereiches.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Mortalität/ Morbidität | Optimum | Hitze-schw. | Kälte-schw. |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------|------------------------------|------------------------|--|-------------------------|---------------|
| Almeida et al. (2013) | Portugal (Lissabon, Porto) | 2000 - 2004 (161 147) | Ökologisch | AK; Erwachsene, Ältere | Mortalität | | 29 °C 25 °C | |
| Baccini et al. (2008) | Mittel/ Nordeuropa, Südeuropa | 1990 - 2001 (80 714) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | | 23 °C AT 29 °C AT | |
| Chen et al. (2017) | USA (Texas) | 1990 - 2011 (k. A.) | Ökologisch | AK; Alle, Ältere | Mortalität | | | 10 °C - 20 °C |
| Fernandez-Raga et al. (2010) | Spanien (Kastilien-Leon) | 1980 - 1998 (k. A.) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | 18,1 °C T _a 11 °C T _{a,min} 26 °C T _{a,max} | | |
| Ishigami et al. (2008) | Europa (Budapest, | 1993 - 2004 (132 849) | Ökologisch | AK; Alle, Ältere | Mortalität | | 24 °C 20 °C 26 °C | |

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Mortalität/ Morbidität | Optimum | Hitze-schw. | Kälte-schw. |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------|
| | London, Mailand) | | | | | | | |
| Laaidi et al. (2006). | Frankreich | 1991 - 1995 (2 628) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | 23 °C – 26 °C T _a | | |
| Röcklöv et al. (2009) | Schweden (Stockholm) | 1990 - 2002 (1 560 000) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | 21 °C | | |
| Revich und Shaposhnikov (2008) | Russland (Moskau) | 2000 - 2006 (8 148) | Ökologisch | LRD; Alle | Mortalität | 18 °C | | |
| Yu et al. (2011) | Australien (Brisbane) | 1996 - 2004 (4 583) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | 22 - 24 °C | | |
| Alessandri ni et al. (2011) | Italien | 2002 - 2006 (15 797) | Ökologisch | AK; Erwachsene, Ältere | Notfall | 25 °C AT | | |
| Islam et al. (2017) | Großbritannien (London) | 2000 - 2009 (31 599) | Ökologisch | LRD; Alle | KH-Aufn. | | 27 °C | |
| Kovats et al. (2004) | Großbritannien (London) | 1994 - 2000 (438 438) | Ökologisch | AK; Alle | KH-Aufn. | 23 °C | | |
| Lin et al. (2009) | USA (New York City) | 1991 - 2004 (40 700) | Ökologisch | AK; Alle | KH-Aufn. | | 29 °C T _a / 32 °C AT | |
| Turner et al. (2013) | Australien (Brisbane) | 2000 - 2007 (783 935) | Ökologisch | AK; Erwachsene | Notfall | | 29 °C | |
| Youssef-Agha et al. (2012) | USA (Pennsylvania) | 2008 - 2010 (168 825) | Ökologisch | Asthma; Grundschul-kinder | Arzt | 4 °C T _a (850 hPa) | | |

Erläuterungen: AK, Atemwegserkrankungen; AT, apparent Temperature; KH, Krankenhaus; T_a, Lufttemperatur; T_{a,min}, Minimum der Lufttemperatur; T_{a,max}, Maximum der Lufttemperatur; hPa, Hektopascal; LRD, untere Atemwegserkrankungen.

Die Temperaturwerte, ab dem die Morbidität oder Mortalität ausgehend vom optimalen Bereich ansteigt können als Kälte- bzw. Hitzeschwelle bezeichnet werden. So haben Baccini et al. (2008) in einer Studie über ganz Europa einen Unterschied der Hitzeschwelle von ca. 5 °C zwischen Nord-/Mitteleuropa und Südeuropa gefunden. Almeida et al. (2013) nennen einen Unterschied der Hitzeschwelle von 4°C innerhalb Portugals zwischen dem südlicher gelegenen Lissabon und Porto im Norden. In dem US-Bundesstaat Texas schwankt die Kälteschwelle zwischen 10 °C und 20 °C, wobei die Kälteschwelle umso höher ist, je südlicher eine Stadt in Texas gelegen ist (Chen et al. 2017). Zur Hitzeschwelle bei Atemwegserkrankungen in den USA haben Lin et al. (2009) einen Lufttemperaturwert von 28,9°C (oder 31,1 °C AT) festgestellt; zu Erkrankungen aufgrund des RSV nennt Welliver (2009) jedoch ebenfalls für die USA eine Hitzeschwelle bei einer Lufttemperatur von 23 °C. Um den regionalen bzw. klimatischen Einfluss auf die Schwellenwerte zu

umgehen, verwenden viele Studien einen variablen Grenzwert meist als ein Perzentil des Lufttemperaturbereiches. So wird als Hitzeschwelle oft das 95., 97. oder 99. Perzentil und das erste bis zehnte Perzentil als Kälteschwelle der lokalen Temperatur verwendet (Hajat et al. 2002; Schwartz 2005; D'Ippoliti et al. 2010; Basu und Malig 2011; Breitner et al. 2014). Um den Effekt ansteigender Lufttemperatur auf Asthma-Anfälle in den USA zu untersuchen ohne das Kälte- und Hitzeextrem einzuschließen, wird von Winquist et al. (2016) die Veränderung vom 25. bis zum 75. Perzentil untersucht. Die Angabe von Auswirkungen der Hitze oder Kälte ab einem bestimmten Perzentilwert ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Orte, Regionen oder Klimate.

Generell erfolgt der Anstieg der Morbidität/Mortalität auf beiden Seiten des Optimums annähernd linear mit steigender und fallender Temperatur, extreme Kälte und Hitze kann jedoch auch zu einem exponentiellen Anstieg führen (Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4). Alessandrini et al. (2011) stellt in Italien einen zunächst schwächeren Anstieg der Notfälle aufgrund von Atemwegserkrankungen von 2,5 % pro 1 °C Lufttemperatur (ab Lufttemperatur von über 25 °C) fest. Ab einer Lufttemperatur über 30 °C steigt die Zahl der Notfälle jedoch um 5 % pro 1 °C an. Von fünf Studien mit Angaben zur prozentualen Veränderung der Morbidität bzw. Mortalität mit sowohl sinkender als auch steigender Temperatur (Tabelle 2) zeigen vier Studien einen stärkeren Anstieg mit zunehmender Wärme. Nur Goodman et al. (2003) geben eine höhere prozentuale Verschlechterung der Atemwegserkrankungen mit sinkender Temperatur an. Dies könnte an der als Temperaturindex gewählten Minimumtemperatur liegen, die eine Wärmebelastung im Vergleich zu einer Kältebelastung unterschätzt.

Tabelle 2: Studien mit Angabe zum prozentualen Anstieg der Todesfälle pro Abnahme / Zunahme der Temperatur um 1 °C.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Veränderung (%) pro - 1 °C | Veränderung (%) pro + 1 °C |
|---|-------------------------------|----------------------|------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Carder et al. (2005) | Schottland | 1981 - 2001 (16 060) | Ökologisch | AK; Alle | 0,3 % T _a < 11 °C | 0,9 % T _a 11 – 15 °C |
| Goodman et al. (2003) | Irland (Dublin) | 1980 - 1996 (80 307) | Ökologisch | AK; Alle | 6,7 % T _{a,min} | 0,8 % T _{a,min} |
| Linares et al. (2015) und Miron et al. (2015) | Spanien (Kastilien-La Mancha) | 1975 - 2008 (53 363) | Ökologisch | AK; Alle | 14,5 % T _{a,min} < -2 °C | 16,4 % T _{a,max} > 37 °C |
| Revich und Shaposhnikov (2008) | Russland (Moskau) | 2000 - 2006 (8 148) | Ökologisch | LRD; Alle | 1,6 % T _a 10 – 18 °C | 8,7 % T _a 18 – 25 °C |
| Yu et al. (2011) | Australien (Brisbane) | 1996 - 2004 (4 583) | Ökologisch | AK; Alle | 5,7 % T _a < 22 °C | 9 % T _a > 22 °C |

Erläuterungen: AK, Atemwegserkrankungen; T_a, Lufttemperatur; T_{a,min}, Minimum der Lufttemperatur; T_{a,max}, Maximum der Lufttemperatur; LRD, untere Atemwegserkrankungen.

Weitere zehn Studien nennen eine Angabe zur Verschlechterung von Atemwegserkrankungen mit sinkenden Temperaturwerten (Tabelle 3), damit liegen Angaben von 15 Studien zur Verfügung. Hajat und Haines (2002) nennen unterschiedliche Prozentangaben für die Krankheitsbilder der oberen und unteren respiratorischen Erkrankungen (LRTI) und von Asthma bei älteren Personen (65+), die Morbidität steigt um 8,5 % bei den oberen Atemwegserkrankungen, um

11 % bei den unteren Atemwegserkrankungen und um 12,4 % bei Asthma. Asthma ist damit das Krankheitsbild, was in dieser Studie am stärksten auf Kältestress reagiert. Ein anderes Verhältnis von URTI und LRTI nennen Mäkinen et al. (2009) für Finnland, wo die oberen Atemwegserkrankungen eine höhere Morbidität mit kühlerer Temperatur zeigen als die unteren Atemwegserkrankungen. Die Studie von Hajat et al. (2016) vergleicht die Auswirkungen von sinkender Lufttemperatur auf Morbidität und Mortalität, wobei die Mortalität mit einer Zunahme von 7,6 % pro 1 °C schwächer reagiert als die Zahlen der Krankenhausaufnahmen, die um 8,5 % steigen. Die Wirkung von Kälte entfaltet sich bei Atemwegserkrankungen vor allem durch das Einatmen von kalter Luft, weniger durch ihre Wirkung auf den gesamten Körper.

Tabelle 3: Studien mit Angabe zum prozentualen Anstieg der Krankheits- bzw. Todesfälle pro Abnahme der Temperatur um 1 °C.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild | Altersgruppe | Mortalität/Morbidität | Veränderung (%) pro - 1 °C |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------------------|--|
| Analitis et al. (2008) | Europa | 1990 - 2000 (k. A.) | Ökologisch | AK | Alle | Mortalität | 3,3 % |
| Chen et al. (2017) | USA (Texas) | 1990 - 2011 (k. A.) | Ökologisch | AK | Alle, Ältere | Mortalität | 3,2 % |
| Zeka et al. (2014) | Irland | 1984 - 2007 (106 366) | Case cross-over | AK, COPD | Erwachsene | Mortalität | 2,5 % k.J. ⁺ |
| Hajat et al. (2016) | Großbritannien | 1993 - 2011 (k. A.) | Ökologisch | AK, COPD | Alle, Ältere | Mortalität, KH-Aufnahme | 7,6 % 8,5 % |
| Almagro et al. (2015) | Spanien (Barcelona) | 2009 (9 804) | Ökologisch | COPD | Alle | KH-Aufnahme | 4,7 % |
| Hajat et al. (2004) | Großbritannien | 1992 - 2001 (330 135) | Ökologisch | LRTI, URTI | Ältere 65+ | Arzt-Besuch | 5 % T _a < 5 °C |
| Hajat und Haines (2002) | Großbritannien (London) | 1992 - 1995 (40 000) | Ökologisch | URTI, LRTI, Asthma | Ältere 65+ | Arzt-Besuch | 8,5 %, 11 %, 12,4 % T _a < 5 °C |
| Hervás et al. (2015) | Spanien (Mallorca) | 2007 - 2011 (371) | Ökologisch | Asthma | Kinder 5 – 14 J. | Notaufnahme | 7,3 % |
| Mäkinen et al. (2009) | Finnland (Kajaani) | 2004 - 2005 (643) | Querschnitt | LRTI, URTI | Junge Erwachsene | Arzt-Besuch | 2,1 %, 4,3 % |
| Nastos und Matzarakis (2006) | Griechenland (Athen) | 2002 (1 212) | Ökologisch | ARI | Alle | Arzt-Besuch | 1,8 % |

⁺ k.J. gilt nur in der kalten Jahreszeit.

Erläuterungen: ARI, akute respiratorische Infektionen; AK, Atemwegserkrankungen; COPD, chronisch obstruktive Lungenerkrankung; LRTI, untere Atemwegsinfektionen; URTI, obere Atemwegsinfektionen; T_a, Lufttemperatur; k. A., keine Angabe; KH, Krankenhaus.

Tests in einer Klimakammer zeigen, dass Menschen mit Belastungsasthma während sportlicher Übungen in einer Umgebungstemperatur von – 15 °C deutlich weniger Schwierigkeiten beim Atmen haben wenn allein die Atemluft (über einen Beatmungsschlauch) auf 32 °C erwärmt wird (Sandsund et al. 2007).

Insgesamt 20 Studien geben einen Prozentwert zur Veränderung des Krankheitsbildes mit zunehmender Wärmebelastung an (Tabelle 2, Tabelle 4). Auch hier gelten die Angaben oft für verschiedene Temperaturbereiche oberhalb einer genannten Hitzeschwelle oder nur für die warme Jahreszeit. Almeida et al. (2013) haben, ausgehend von dem thermischen Optimum für Lissabon und Porto, auch unterschiedliche prozentuale Veränderungen der Morbidität in den beiden Städten untersucht. So steigen die Notfälle aufgrund von Atemwegserkrankungen im südlicher gelegenen Lissabon um 8 % pro 1 °C Temperaturanstieg, in Porto jedoch nur um 4,7 %. Die europäische Studie von Baccini et al. (2008) zeigt mit 6,7 % ebenfalls eine leicht höhere prozentuale Veränderung in den südlich-mediterranen Regionen als in den nördlich-kontinentalen Regionen mit 6,1 %, gültig hier allerdings für die Mortalität. Das gleiche gilt für die Angaben von Michelozzi et al. (2009), wobei die 2,1 % Veränderung in den nördlich-kontinentalen und die 1,2 % in den südlich-mediterranen Regionen für Krankenhausaufnahmen gelten und erst ab einem AT -Maximum über dem 90 % Perzentil. Der von Analitis et al. (2008) angegebene Wert von 3,3 % Steigung der Mortalität für Europa liegt ungefähr zwischen den Werten der anderen europäischen Studien.

Tabelle 4: Auswahl an Studien mit Angabe zum prozentualen Anstieg der Krankheits- bzw. Todesfälle pro Zunahme der Temperatur um 1 °C.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Mortalität/ Morbidität | Veränderung pro + 1 °C |
|-----------------------------|---|-------------------------|------------|------------------------------|------------------------|--|
| Almeida et al. (2013) | Portugal (Lissabon, Porto) | 2002 - 2004 (161 147) | Ökologisch | AK; Erwachsene, Ältere | Mortalität | 8 % T _a > 29 °C 4,7 % T _a > 25 °C |
| Baccini et al. (2008) | Europa (nördlich-kontinental, südlich-mediterran) | 1990 - 2001 (80 714) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | 6,1 % T _a > 23 °C w.J. + 6,7 % T _a > 29 °C w.J. + |
| Basu und Malig (2011) | USA (Kalifornien) | 1999 - 2005 (47 212) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | 0,8 % * 7,6 % AT > 90. Perzentil |
| Gasparrini et al. (2012) | Großbritannien | 1985 - 2012 (289 516) | Ökologisch | AK, COPD, Asthma; Alle | Mortalität | 4,1 %, 4,3 %, 5,5 % T _a > 93. Perzentil |
| Hajat et al. (2002) | Großbritannien (Groß-London) | 1976 - 1996 (40 000) | Ökologisch | AK; Alle | Mortalität | 5,4 % T _a > 97. Perzentil / 21,5 °C |
| Alessandri ni et al. (2011) | Italien | 2002 - 2006 (157 97) | Ökologisch | AK; Erwachsene, Ältere | Notfall | 2,7 % T _a > 25°C 5 % T _a > 30°C |
| Anderson et al. (2013) | USA | 1999 - 2008 (1 141 458) | Ökologisch | AK, RTI, COPD, Ältere 65+ | KH-Aufnahme | 0,8 % * w.J. + |

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Mortalität/ Morbidität | Veränderung pro + 1 °C |
|------------------------------|---|-------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------|---|
| Ferrari et al. (2012) | Deutschland (Bayern) | 2006 - 2007 (25 Mio.) | Ökologisch | COPD; Alle | Arzt-Besuch | 1,3 % |
| Green et al. (2010) | USA (Kalifornien) | 1999 - 2005 (238 754) | Case cross-over | AK; Alle | KH-Aufnahme | 0,4 % * w.J. + |
| Kovats et al. (2004) | Großbritannien (Groß-London) | 1994 - 2000 (438 438) | Ökologisch | AK; Alle | KH-Aufnahme | 5,4 % $T_a > 23\text{ °C}$ |
| Lin et al. (2009) | USA (New York City) | 1991 - 2004 (40 700) | Ökologisch | AK, COPD, Asthma; Alle | KH-Aufnahme | 3,1 %, 7,6 %, 3,5 % $T_a > 29\text{ °C}$ |
| Mentzakis und Delfino (2010) | Griechenland (Athen) | 1987 - 1999 (1 051 200) | Ökologisch | AK; Alle | KH-Aufnahme | 2 – 4 % $T_{a,max}$ -3 – -6 % $T_{a,min}$ -Zunahme |
| Michelozzi et al. (2009) | Europa (nördlich-kontinental, südlich-mediterran) | 1990 - 2001 (473 104) | Ökologisch | AK; Alle, Ältere | KH-Aufnahme | 1,2 %, (3,1 % Ältere) 2,1 %, (4,5 % Ältere) $AT_{max} > 90\text{ %}$ Perzentil |
| Ostro et al. (2010) | USA (Kalifornien) | 1999 - 2005 (783 935) | Case cross-over | AK; Alle | KH-Aufnahme | 0,4 % - 1,3 % * w.J. + |
| Turner et al. (2013) | Australien (Brisbane) | 2000 - 2007 (438 438) | Ökologisch | AK; Erwachsene, Ältere 75+ | Notfall | 10,6 %, 16,8 % $T_a > 29\text{ °C}$ |

* Originalwerte in % pro 10 °F, + w.J., gilt nur in der warmen Jahreszeit

Erläuterungen: AK, Atemwegserkrankungen; $AT_{(max)}$, (maximale) apparent temperature; COPD, chronisch obstruktive Lungenerkrankung; KH, Krankenhaus; T_a , Lufttemperatur; $T_{a,min}$, Minimum der Lufttemperatur; $T_{a,max}$, Maximum der Lufttemperatur.

Gasparrini et al. (2012) und Lin et al. (2009) vergleichen den Effekt der Wärmebelastung auf unterschiedliche Krankheitsbilder. Beide Studien nennen einen niedrigeren Prozentwert für die allgemeinen Atemwegserkrankungen (4,1 % und 31 %) als für Verschlechterungen bei COPD-Erkrankten (4,3 % und 7,6 %). Für Todesfälle aufgrund von Asthma nennen Gasparrini et al. (2012) eine Steigerung von 5,5 %, den höchsten Wert der drei Krankheitsbilder; für Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma nennen Lin et al. (2009) 3,5 %, dieser Wert liegt unter dem für COPD. Die Studie von Ferrari et al. (2012) aus Bayern untersucht den Effekt der Wärmebelastung auf COPD-Erkrankten mit der Anzahl ihrer Arzt-Besuche. Mit steigender Lufttemperatur steigt die Zahl der Arztbesuch um 1,3 %, es wurde kein Unterschied des Temperatureffektes zwischen Nord- und Süd-Bayern festgestellt.

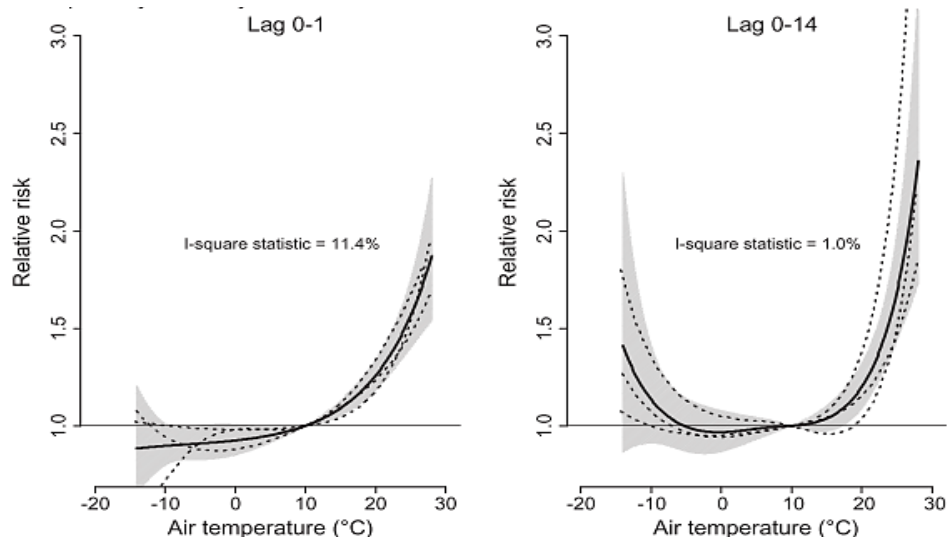
Ältere Menschen sind von vielen Krankheiten in besonderem Maße betroffen und der Krankheitsverlauf ist häufig schwerer (vor allem bei COPD, seltener bei Asthma), da die körperliche Konstitution nicht mehr so stark ist wie bei jüngeren Personen. Die Morbidität und Mortalität ist bei Älteren (meist ab 65 Jahren gerechnet) oft deutlich erhöht (Kovats et al. 2004; D'Ippoliti et

al. 2010; Almeida et al. 2013). Vor allem die Wärmebelastung ist für ältere Personen schwerer zu kompensieren, daher sind sie während einer Hitzewelle einem erhöhten Risiko ausgesetzt (Wichmann et al. 2011; Turner et al. 2013; Breitner et al. 2014). Michelozzi et al. (2009) zeigt, dass Atemwegserkrankungen pro 1 °C Temperaturanstieg bei Personen über 75 Jahren um 3,1 % bis 4,5 % (nördlich-kontinentales und südlich-mediterranes Europa) zunehmen, während der Anstieg im Durchschnitt der Altersklassen nur 1,2 % bis 2,1 % beträgt. Aber auch die Kälte und die im Winter grassierenden Infektionen bereiten älteren Menschen mit geschwächtem Immunsystem Probleme, aus einer Grippe kann sich schneller eine gefährlichere Lungenentzündung entwickeln.

Ein weiterer Unterschied zwischen Kälte- und Wärmeeffekt liegt in der Dauer und der Direktheit der Wirkung (Abbildung 4). Niedrige Temperaturwerte zeigen meist einen verzögerten, aber länger anhaltenden Effekt auf Mortalität und Morbidität, daher muss bei einer Untersuchung des Kälteeffektes ein Lag von mehreren Tagen bis Wochen berücksichtigt werden (Carder et al. 2005; Revich und Shaposhnikov 2008; Breitner et al. 2014). Der Wärmeeffekt tritt direkter auf, die Wirkung kann sich bereits am ersten heißen Tag zeigen und sie steigert sich innerhalb von zwei bis drei Tagen (Monteiro et al. 2013; Monteiro und Velho 2014; Gronlund et al. 2016).

Revich und Shaposhnikov (2008) stellt in Moskau einen Kälteeffekt fest, der erst ab einer Verzögerung von 5 Tagen eintritt, der Hitzeeffekt zeigt aber bereits ab dem ersten Tag seine Wirkung auf chronische untere Atemwegserkrankungen. Nach einigen Tagen geht die Wirkung der Hitze meist wieder zurück und wird in manchen Fällen sogar negativ. Dies ist der sogenannte „Harvesting-Effekt“, der einen vorzeitigen durch die Hitze bedingten Tod von bereits geschwächten und anfälligeren Personen beschreibt, die auch ohne Hitzeeinfluss bald verstorben wären (Koppe 2005).

Abbildung 4: Vergleich des zeitlichen Wirkungsbereiches von Kälte und Hitze auf die Mortalität von Atemwegserkrankungen in Deutschland von 1990 bis 2006.



Quelle: Breitner et al. (2014).

Ob Kälte bzw. Hitzewellen aufgrund ihrer Dauer oder Intensität einen Effekt auf die Mortalität oder Morbidität zusätzlich zu der Wirkung kalter oder heißer Tage zeigen ist noch unklar in der Literatur. Chen et al. (2017) können keinen zusätzlichen Effekt einer Kältewelle auf die Mortalität in Texas feststellen, Röcklöv et al. (2009) zeigt vor allem bei Frauen ein erhöhtes Risiko bei einer Kältewelle, vor allem je länger diese andauert. Bei Hitzewellen haben Madrigano et al. (2015) keinen Effekt auf COPD-Erkrankte und Smith et al. (2016) ebenfalls keinen Effekt auf

Asthma-Erkrankte erkannt. Dagegen zeigen einige Studien einen zusätzlichen Effekt einer Hitzeperiode (Mastrangelo et al. 2007; Rey et al. 2007; Röcklöv et al. 2009; Sheridan und Lin 2014; Sherbakov et al. 2018).

Nicht nur der konkrete Wert der Lufttemperatur hat einen Effekt auf die Gesundheit, auch eine Lufttemperaturänderung kann negative oder positive Auswirkungen auf Atemwegserkrankungen haben. Mireku et al. (2009), Lin et al. (2012b) und Zhan et al. (2017) haben einen signifikanten Effekt der Temperaturzunahme vom Vortag zum Tag der Krankenhausaufnahme oder des Todesfalles erkannt, eine Temperaturabnahme ist bei Zhan et al. (2017) dagegen negativ korreliert, also ein Schutzfaktor.

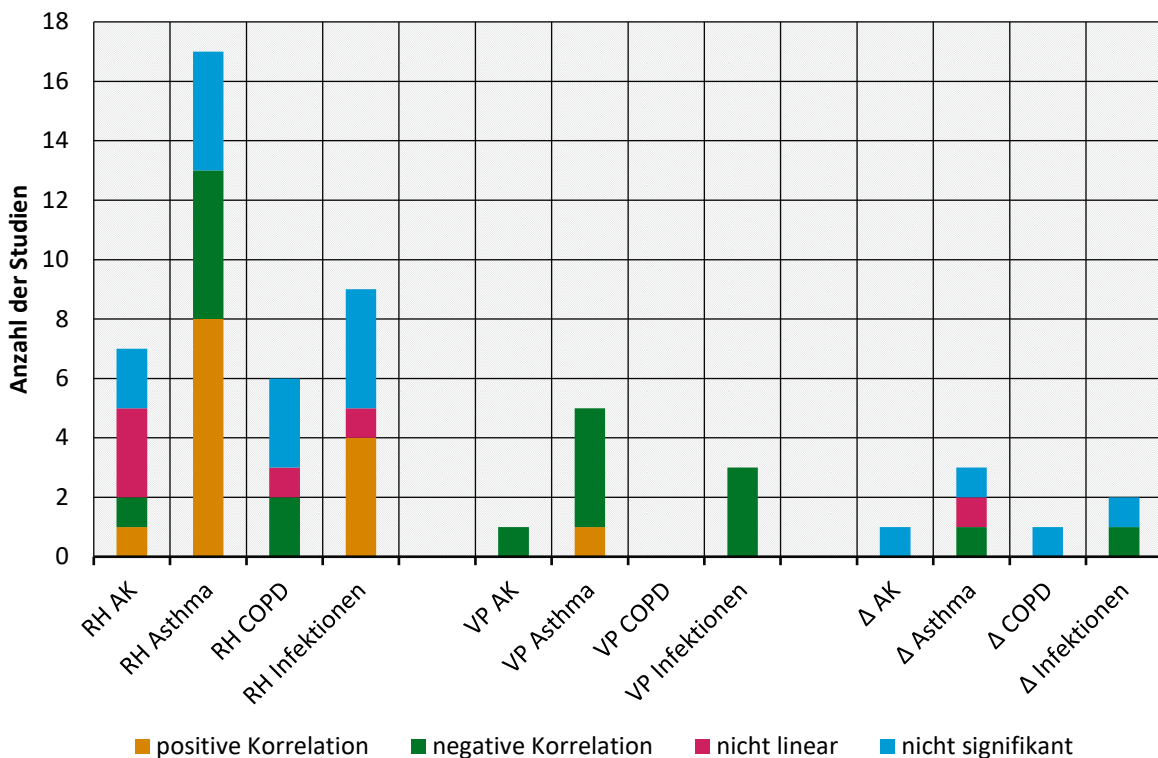
Die innertägliche Temperaturschwankung wurde ebenfalls von mehreren Studien untersucht, stellte sich aber meist als nicht signifikanter Faktor heraus (acht von zehn Studien). Lin et al. (2012b) fand für den Staat New York einen positiven Zusammenhang, d. h., je größer die Differenz zwischen $T_{a,\min}$ und $T_{a,\max}$ innerhalb eines Tages, desto höher ist das Risiko. Bei Priftis et al. (2006) stellt sich jedoch ein inverser Zusammenhang heraus, eine große Differenz ist mit einem geringeren Risiko verbunden.

2.2.3 Luftfeuchte und Niederschlag

Die thermische Umgebung wird von den meteorologischen Parametern als wichtigster Einflussfaktor auf die Gesundheit angesehen. Aber auch andere Parameter beeinflussen Krankheitsverläufe oder das Wohlbefinden der Menschen. Die häufige Verwendung eines aus Lufttemperatur und Luftfeuchte zusammengesetzten Faktors wie die apparent temperature (Steadman 1984) zeigt, dass die Wirkung der Luftfeuchte ebenfalls beachtet wird, aber nicht immer unabhängig agiert. Die Luftfeuchte wird in Studien, wenn sie als eigenständiger Faktor betrachtet wird, in Form der relativen Feuchte (RH), der absoluten Feuchte (AH), der Taupunkttemperatur (T_d) oder des Dampfdruckes untersucht (VP). Wird die relative Feuchte als Maß gewählt, muss die Abhängigkeit mit der Lufttemperatur beachtet werden. AH, VP und T_d sind ein Maß des absoluten Feuchtegehalts, da sie unabhängig von anderen meteorologischen Größen sind und werden daher hier zusammengefasst betrachtet. Eine geringe Luftfeuchte führt zur Reizung und Austrocknung der Schleimhäute der Atemwege, was Asthma-Anfälle auslösen kann. Zusätzlich sind trockene Atemwege schneller anfällig für Infektionen. Auch scheinen Viren, die typischer Weise eine Erkältung oder andere Atemwegserkrankungen auslösen, insbesondere die Influenza, in kalter und trockener Luft stabiler zu sein (Lowen et al. 2007). Mediziner geben auch eine Belastung von Allergikern und Asthmatikern durch das Einatmen von sehr feuchter Luft an, da durch die vermehrten Wasserdampfmoleküle weniger Sauerstoff in der Lunge aufgenommen werden kann. Eine hohe Luftfeuchte kann auch die Vermehrung und Verbreitung allergener Stoffe wie Hausstaubmilben, Sporen, Pollen und Erreger bedeuten (Makra et al. 2015). Insgesamt haben 56 Studien einen der Feuchteparameter auf einen Zusammenhang mit Atemwegserkrankungen hin untersucht, davon haben 49 Studien Morbiditätsdaten (Abbildung 5), verwendet, die anderen sieben sind Mortalitätsstudien (Tabelle A 1). In 45 der Morbiditätsstudien wird die relative Feuchte als Einflussgröße untersucht, 13 davon stellen keinen signifikanten Zusammenhang zur Morbidität von Atemwegserkrankungen fest. Eine signifikante Wirkung von RH kann in 26 Morbiditätsstudien gezeigt werden, wobei acht Studien eine inverse und 13 Studien eine positive Korrelation errechnen. Weitere fünf Studien finden einen nicht-linearen Zusammenhang, mit einem negativen Einfluss von sowohl sehr niedrigen als auch sehr hohen RH-Werten auf die Gesundheit. In den insgesamt 45 Morbiditätsstudien wird die Wirkung der RH 17-mal auf Asthma, sieben Mal auf allgemeine Atemwegserkrankungen und neun Mal auf Infektionen untersucht mit hauptsächlich positiver Assoziation als Ergebnis. COPD-Erkrankte zeigen jedoch entweder negative oder nicht-lineare Korrelationen mit RH. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Studien,

die ein Maß der absoluten Feuchte als Einflussgröße verwenden (neun Morbiditätsstudien), zeigt sich ein anderes Bild. Hier stellt nur eine Studie eine positive Korrelation fest (diese gilt für die Taupunkttemperatur in einer Höhe von ca. 850 hPa (Youssef-Agha et al. 2012), acht Studien geben dagegen einen inversen Zusammenhang mit den zusammengefassten Atemwegserkrankungen, Asthma und Infektionen an. COPD ist in diesen Studien nicht behandelt. Bei den Mortalitätsstudien zeigt sich ebenfalls, dass zwischen RH und den Atemwegserkrankungen eher ein positiver Zusammenhang, bei der Verwendung eines absoluten Feuchtemaßes (absolute Feuchte, Wasserdampfdruck oder Taupunkttemperatur) jedoch nur negative Korrelationen gefunden werden (Tabelle A 2).

Abbildung 5: Übersicht der in Morbiditätsstudien (2001 – 2018) untersuchten Luftfeuchteparameter im Zusammenhang mit verschiedenen Krankheitsbildern und die daraus resultierenden Ergebnisse.



Erläuterungen: AK, Atemwegserkrankungen; RH, Relative Feuchte; VP, Wasserdampfdruck; Δ, Änderung der Feuchte vom Vortag zum Krankheitstag; COPD, chronische obstruktive Lungenerkrankung. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Die Veränderung der Luftfeuchte zwischen dem Vortag und des untersuchten Tages wird in fünf Studien (vier Morbiditätsstudien, eine mit Mortalitätsdaten) betrachtet, davon finden drei keinen signifikanten Zusammenhang zu Atemwegserkrankungen, Asthma oder COPD. Mireku et al. (2009) findet für Michigan in den USA einen generellen Zusammenhang mit negativen Auswirkungen einer Änderung der Luftfeuchte auf Asthma, sowohl für eine Abnahme als auch eine Zunahme der Feuchte. Ikäheimo et al. (2016) dagegen nennen für Nordfinland eine negative Korrelation der Arztbesuche mit einer Luftfeuchtereduktion während der vergangenen drei Tage. Zwei Studien nennen einen optimalen Luftfeuchtwert, beide sind jedoch als relative Feuchte angegeben. (Fernandez-Raga et al. 2010) gibt 24 % RH als optimal an, Islam et al. (2017) nennt den RH-Wertebereich zwischen 40 % und 90 %, außerhalb steigt das Morbiditätsrisiko jeweils an. Den Gegensatz zwischen den Ergebnissen für die relative und die absolute Feuchte findet man auch innerhalb derselben Studie (Tabelle A 2). Priftis et al. (2006), Nastos et al. (2008) und

Hervás et al. (2015) nennen einen negativen Einfluss von hohen relativen Feuchtwerten aber gleichzeitig von niedrigen absoluten Feuchtwerten. Priftis et al. (2006) und Nastos et al. (2008) verwenden jedoch denselben Datensatz, daher ist es wenig erstaunlich, dass die Resultate übereinstimmen. Auffällig ist, dass alle sechs aufgelisteten Studien Morbiditätsdaten verwenden, insbesondere Asthma-Anfälle, und überdurchschnittlich oft Kinder die Untersuchungsgruppe bilden. Ebenfalls gemeinsam haben diese Studien, dass ausschließlich eine negative Korrelation mit der Lufttemperatur hergestellt wurde.

Der negative Einfluss von Kälte, geringer absoluter Feuchte und hoher relativer Feuchte spiegelt die Wetterbedingungen in der kalten Jahreszeit wider, dazu passt das festgestellte Maximum der Krankheitsfälle im Herbst, Winter und Frühling und die Auswertung der Monatsmittelwerte. Nur Tosca et al. (2014) stellt eine negative Korrelation sowohl für die relative als auch absolute Feuchte fest.

Die hohe Anzahl an signifikanten Ergebnissen zur Luftfeuchte von Studien mit Kindern zeigt sich auch in der gesamten Studienauswahl. Ob die Wirkung der Luftfeuchte auf Atemwegserkrankungen bei Kindern tatsächlich so viel stärker ausgeprägt ist oder ob diese Studien auf die Untersuchung dieses Parameters mehr Wert legen, ist noch unklar und müsste näher untersucht werden. Ein deutlicher Unterschied ist auch zwischen den Mortalitäts- und Morbiditätsstudien zu erkennen. Der Prozentsatz der Studien mit Untersuchung der Luftfeuchte liegt bei den Mortalitätsstudien bei 16 % (sieben von 45 Studien, sechs davon signifikant), bei den Morbiditätsstudien bei 36 % (49 auf 136 Studien).

Die Wirkung der Luftfeuchte auf die Atemwege kann je nach Krankheit unterschiedlich ausfallen. Mäkinen et al. (2009) untersuchte den Zusammenhang von Kälte und Luftfeuchte mit Erkältungen, Rachenentzündungen, oberen und unteren Atemwegserkrankungen. Während die Assoziation mit Kälte für alle drei Krankheitsbilder gleich ist, wird nur zwischen URTI und Rachenentzündungen ein signifikanter Zusammenhang mit geringer Luftfeuchte festgestellt. Aber nicht nur für infektionsbedingte Erkrankungen ist die trockene (und kalte) Luft problematisch. Tests von Stensrud et al. (2006) in einer Klimakammer mit Personen, die unter Belastungsasthma leiden, zeigen, dass sportliche Betätigung bei 85 % Luftfeuchte signifikant weniger Asthma-Anfälle auslösen als Übungen bei 40 % Luftfeuchte (die Lufttemperatur wurde konstant bei 20 °C gehalten).

Niederschlag in seiner flüssigen Form kann Partikel und Allergene aus der Luft „waschen“, dieser Effekt tritt allerdings erst nach einem längeren Zeitraum und einer größeren Menge an Regen auf (Islam et al. 2017). Kürzere Niederschlagsperioden von wenigen Tagen können zu verstärkter Ansammlung von lungengängigen Partikeln von Pollen und Feinstaub führen und dadurch eine nachteilige Wirkung auf Atemwegserkrankungen haben (Villeneuve et al. 2005; Priftis et al. 2006; Tosca et al. 2014; Islam et al. 2017). Es berichten sechs der 19 Studien von einem direkten Zusammenhang des Niederschlags auf Atemwegserkrankungen (Villeneuve et al. 2005; Priftis et al. 2006; Soneja et al. 2016; Gomez-Barroso et al. 2017; Islam et al. 2017), fünf Studien nennen auch eine negative Korrelation (Villeneuve et al. 2005; Stach et al. 2007; Wang und Yousef 2007; Pesce et al. 2016; Islam et al. 2017) und zehn Studien finden keine signifikante Wirkung. In einer Studie im Großraum London kann gezeigt werden, dass hoher täglicher Niederschlag (≥ 30 mm) zu einer Zunahme der Krankenhausaufnahmen mit LRTI führt, dies gilt als direkte Wirkung innerhalb der ersten zwei Tage und für eine Verzögerung von acht bis zehn Tagen. Extremer Niederschlag zeigt mit einer Verzögerung von 13 bis 20 Tagen eine negative Beziehung, was die Autoren mit dem Reinigungseffekt der Luft durch den Regen erklären (Islam et al. 2017). Niederschlag als meteorologische Einflussgröße wurde wie bei der Luftfeuchte hauptsächlich in Morbiditätsstudien (95 %) und mit Kindern als Untersuchungsgruppe (35 %) analysiert.

2.2.4 Luftdruck

Der Luftdruck ist eine weitere meteorologische Größe, dem eine Wirkung auf Atemwegserkrankungen zugeschrieben wird. Von den ausgewählten Studien untersuchen jedoch nur 14 Studien den Effekt des Luftdruckes, vier davon finden keinen signifikanten Zusammenhang (Bulajich et al. 2005; Nastos und Matzarakis 2006; Mireku et al. 2009; Hervás et al. 2015), eine weitere Studie nennt den Luftdruck zwar als wichtigen Einflussfaktor für ein Modell zur Vorhersage der wöchentlichen RSV-Aktivität, gibt aber keine Richtung dieses Einflusses (ob positive oder negative Korrelation) an (Walton et al. 2010). Es verbleiben neun Studien mit signifikanten Aussagen zum Effekt des Luftdruckes, wovon eine Zweidrittelmehrheit einen direkten Zusammenhang (positive Korrelation) mit den Atemwegserkrankungen angibt (Priftis et al. 2006; Fernandez-Raga et al. 2010; Ferrari et al. 2012; Monsalve 2013; Stelmach et al. 2016; Stevanović et al. 2016), ein Drittel findet einen inversen Zusammenhang (negative Korrelation) (Wanka et al. 2014; Linares et al. 2015; Makra et al. 2015; Miron et al. 2015). Es ist kein gemeinsames Muster der Studien zu erkennen, weder die Mortalität- oder Morbidität, noch das Krankheitsbild, die Region oder die Altersgruppe geben Aufschluss über einen direkten oder inversen Zusammenhang. Auch mit anderen meteorologischen Parametern ist kein eindeutiger Zusammenhang zu finden. Von den beiden Studien aus Bayern geben Wanka et al. (2014) eine negative Wirkung niedrigen Luftdruckes auf verschiedene Atemwegserkrankungen an, Ferrari et al. (2012) dagegen nennen eine negative Wirkung von hohem Luftdruck, die Anzahl der Arztbesuche aufgrund von COPD liegen um 1 % höher bei einem um 2 hPa erhöhten Luftdruck. Das gleiche lässt sich bei den Studien aus Spanien erkennen, zwei Studien finden einen direkten Zusammenhang (positive Korrelation) des Luftdruckes auf Atemwegserkrankungen (Fernandez-Raga et al. 2010; Monsalve 2013); Linares et al. (2015) schreiben wiederum dem niedrigen Luftdruck eine Zunahme der CLRD-Mortalität zu, diese Wirkung gilt jedoch nur in der kalten Jahreszeit. Einen Monatsmittelwert für den optimalen Luftdruck geben Fernandez-Raga et al. (2010) mit 915 hPa an, dieser gilt für die Hochebene Kastilien-León in Zentralspanien auf 600 – 800 m über dem Meeresspiegel. Da der Luftdruck stark mit der Geländehöhe variiert, muss dieser Wert in Relation dazu betrachtet werden. Drei Studien haben auch eine Änderung des Luftdruckes vom Vortag untersucht, erkennen aber keine signifikante Wirkung auf Atemwegserkrankungen.

2.2.5 Strahlung

Die Strahlungsverhältnisse werden seltener auf einen Zusammenhang mit Atemwegserkrankungen hin untersucht. Von den ausgewählten Studien behandeln neun Studien die Solar- oder Globalstrahlung, die UVB-Strahlung oder die Sonnenscheindauer, wovon vier Studien keinen Effekt auf Atemwegserkrankungen finden (Donaldson 2006; Nastos und Matzarakis 2006; Gosai et al. 2009; Islam et al. 2017). Die Ergebnisse der restlichen Studien sind nicht eindeutig bzw. nicht direkt auf den Zusammenhang mit der Gesundheit bezogen. So finden Stach et al. (2007) in Polen eine schwache Assoziation der Sonnenscheindauer mit einer vermehrten Pollenkonzentration und eine ebenfalls schwache negative Korrelation des Bedeckungsgrades. Welliver (2009) dagegen zeigt für die USA eine schwächende Wirkung von UVB-Strahlung auf die Aktivität und Überlebensdauer des RSV. Eine Studie aus Deutschland zieht einen direkten Zusammenhang zwischen der Anzahl Arztbesuche aufgrund von COPD in Bayern und der Solarstrahlung. Ist die tägliche Solarstrahlung um ca. 67 W/m² erhöht, reduziert sich die Anzahl an ambulanten Behandlungen einer COPD um 1 %, wobei in Südbayern bereits eine Erhöhung der Solarstrahlung von 44 W/m² ausreicht, in Nordbayern benötigt es dagegen einen Anstieg um 134 W/m² (Ferrari et al. 2012).

2.2.6 Wind

Der Wind kann in mehrfacher Hinsicht einen Einfluss auf das Wohlbefinden von Erkrankten mit Atemwegserkrankungen haben. Sowohl die Windgeschwindigkeit als auch die Windrichtung beeinflussen die Luftqualität vor Ort. Eine erhöhte Windgeschwindigkeit kann zu einer geringeren Konzentration von Luftbeimengungen und luftgetragener Allergene wie Hausstaubmilben und Pollen führen, da sie stärker verteilt und abtransportiert werden. Wind kann daher ein Schutzfaktor für Asthmatiker und Allergiker sein (Stach et al. 2007; Mazonq et al. 2017a). Eine höhere Windgeschwindigkeit hat jedoch auch negative Auswirkungen auf Atemwegserkrankungen, dies sagt die Mehrzahl der Studien zu dieser Frage aus (sieben von elf Studien, (Nastos und Matzarakis 2006; Nastos et al. 2008; du Prel et al. 2009; Ferrari et al. 2012; Tosca et al. 2014; Hervás et al. 2015; Islam et al. 2017)). Diese negativen Auswirkungen werden oftmals gerade durch Luftbeimengungen, Staub und Pollen hervorgerufen, die durch den Wind aufgewirbelt, an anderer Stelle kumuliert oder durch Fallwinde für den Menschen erreichbar gemacht werden. Ähnlich wie bei der Luftfeuchte sind auffällig viele Asthmastudien bei Kindern, die auch den Wind als Einflussgröße untersuchen.

Das Einsetzen der Wirkung des Windes auf Atemwegserkrankungen ist zum Teil verzögert. Islam et al. (2017) findet eine starke Wirkung hoher Windgeschwindigkeit ab ca. 13 m/s auf Erkrankungen des unteren Atemtraktes (LRD) allerdings mit einer Verzögerung von acht bis 15 Tage. Ein schwächerer Effekt ist bereits ab 1 m/s zu beobachten. Eine hohe Windgeschwindigkeit hat aber auch eine kurzfristige positive Wirkung auf LRD innerhalb der ersten beiden Tage (Islam et al. 2017). Auch die Windrichtung kann eine Rolle spielen, wenn es um den Transport von Partikeln oder Gasen in der Luft geht. Dies ist jedoch sehr abhängig von den regionalen oder überregionalen Bedingungen. Garcia et al. (2011) beobachten einen Ozontransport mit Luftpaketen aus dem mittleren Westen der USA in den Bundesstaat New York, der zu einer erhöhten Anzahl von Krankenhausaufnahmen von Erkrankten mit Atemwegserkrankungen führt, während eine nördliche Windrichtung zu keinem solchen Anstieg führt.

2.2.7 Luftschadstoffe

Die Wirkung von Luftbeimengungen wie Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Kohlenmonoxid (CO), Ozon (O₃) und Feinstaub in verschiedenen Partikelgrößen (PM₁₀ und PM_{2,5}) auf die Atemwege wurde in zahlreichen Morbiditätsstudien untersucht (Tabelle A 3). Nur wenige Studien mit Mortalitätsdaten untersuchen den Einfluss von Luftbeimengungen (Tabelle 5). Die Schadstoffe reizen die Schleimhäute und führen zu Augenreizungen, Husten, Atembeschwerden und einer eingeschränkten Lungenfunktion (Bunz und Mücke 2017). Aufgrund der hohen Anzahl an Studien und der Interaktion von Luftbeimengungen mit den Wetterbedingungen wurden nur diese für die Auswertung herangezogen, die den Einfluss der Luftbeimengungen im Zusammenhang mit meteorologischen Parametern untersuchen. Studien, die sich allein auf Luftbeimengungen konzentrieren und keine Meteorologie berücksichtigen, wurden nicht berücksichtigt.

Das Auftreten und die Verteilung der Luftbeimengungen hängt von der Jahreszeit und den Wetterbedingungen ab (Barnett et al. 2005; Ito et al. 2007; Hebborn und Cakmak 2015). Luftbeimengungen können sich vor allem in winterlichen Inversionswetterlagen und bei windschwachen Hochdruckwetterlagen im Sommer in den unteren Luftschichten sammeln. So treten NO, NO₂, SO₂ und CO im Winter in höheren Konzentrationen auf und sind meist invers mit der Lufttemperatur korreliert (Ito et al. 2007; Lavigne et al. 2014).

Die negativen Auswirkungen dieser Luftbeimengungen auf die Atemwege ist aber nicht auf den Winter beschränkt. So beschreiben Barnett et al. (2005) für Australien und Neuseeland einen verstärkenden gesundheitlichen Effekt von NO₂ mit einer hohen Lufttemperatur. Stieb et al.

(2009) geben in Kanada für alle Luftbeimengungen eine stärkere Wirkung auf Atemwege in der warmen Jahreszeit an. Bei Linares et al. (2015) gilt die Korrelation von NO₂ mit Asthma nur in den wärmeren Regionen Europas. Warme und feuchtere Luft im Sommer scheint die reizende Wirkung der Luftbeimengungen auf die Atemwege deutlich zu verstärken. Wanka et al. (2014) nennen für Bayern eine um 3,9 % erhöhte Anzahl an COPD-Arztbesuchen pro 1 µg/m³ NO₂.

Die Studie von Ayres-Sampaio et al. (2014) aus Portugal zeigt, dass die Krankenhauseinweisungen aufgrund von Asthma durch städtische Landnutzung zusammen mit hohen NO₂-Werten, geringer Vegetation (niedriger NDVI, normalized difference vegetation index) und höherer Lufttemperatur steigen. In ländlicheren Gebieten mit vermehrter Vegetation zeigt NO₂ keinen Zusammenhang mit Asthma. Die allermeisten Untersuchungen finden im urbanen Raum statt, was zum Großteil an der Konzentration medizinischer Einrichtungen in Städten im Vergleich zum Land liegt. Daher gelten die Ergebnisse vor allem für die städtische Umgebung.

Tabelle 5: Mortalitätsstudien über den Zusammenhang zwischen Luftbeimengungen und der Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen.

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Partikel | Gase |
|-------------------------|------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|-----------|---|
| Chan et al. (2015) | USA | 1996 – k. A. (k. A.) | Ökologisch | COPD; Alle | PM10: ns | NO ₂ , CO, O ₃ : ns |
| Monteiro et al. (2013) | Portugal (Porto) | 2002 – 2007 (k. A.) | Ökologisch | AK, COPD; Alle, Ältere | PM10: s+ | |
| Stafoggia et al. (2008) | Italien | 1997 – 2004 (20 921) | Case cross-over | AK; Erwachsene 35+ | s+ w.J. + | |
| Vanos et al. (2014) | Kanada | 1981 – 1999 (k. A.) | Ökologisch | AK; Alle | | NO ₂ , CO, SO ₂ , O ₃ ; s+ |
| Zanobetti et al. (2012) | USA | 1985 – 2005 (3 749 096) | Kohort-Studie | COPD; Alle, Ältere | | O ₃ : s+ |

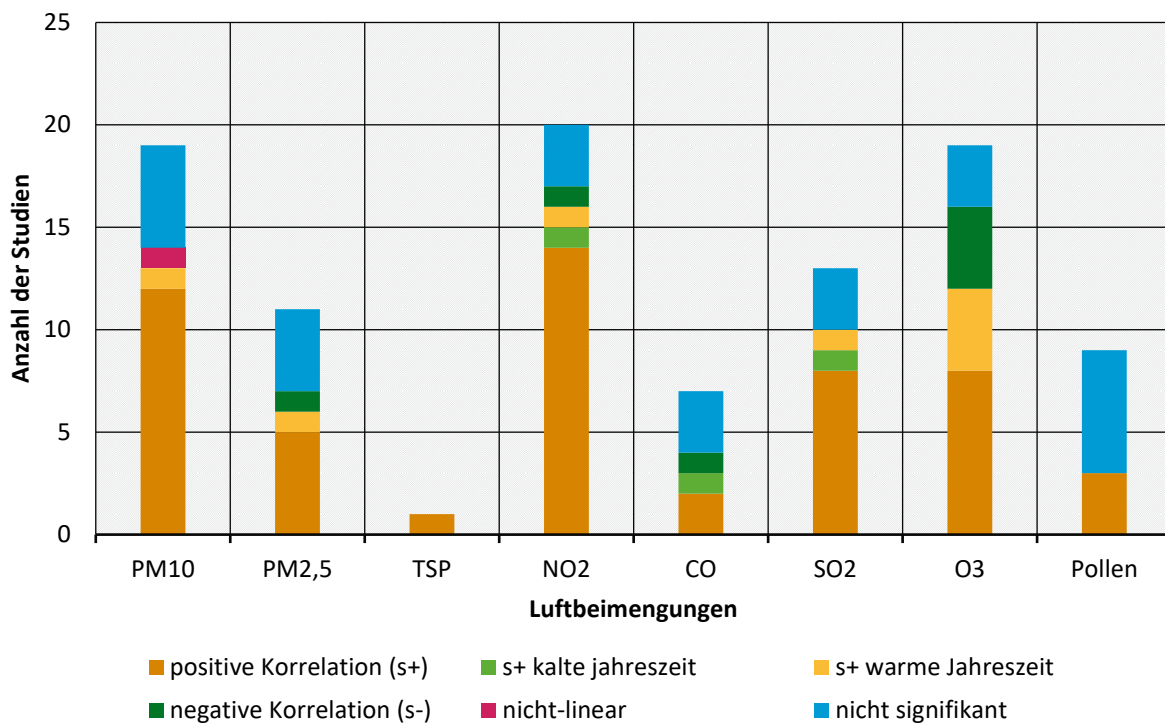
+ w.J. gilt nur in der warmen Jahreszeit.

Erläuterungen: k. A., keine Angabe; s+, signifikant positive Korrelation; ns, nicht signifikante Korrelation; AK, Atemwegserkrankungen; COPD, chronische obstruktive Lungenerkrankung; CO, Kohlenmonoxid; PM10, Partikel mit einem aero-dynamischen Durchmesser ≤ 10 µm ; PM2,5, Partikel mit einem Durchmesser ≤ 2,5 µm ; NO₂, Stickstoffdioxid; SO₂, Schwefeldioxid; O₃, Ozon.

Erhöhte Ozonwerte in Bodennähe treten hauptsächlich im Sommer auf und sind direkt mit der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer korreliert, aber invers mit der relativen Feuchte und mit den meisten anderen Luftbeimengungen (Lacour et al. 2006; Ito et al. 2007; Stieb et al. 2009). Die geringe Konzentration von Ozon im Winter, wo die Rate der Atemwegserkrankungen aber am höchsten ist, führt bei manchen Studien, die keine Kontrolle der Jahreszeiten durchführen, zu einer negativen Korrelation mit Ozon (Freitas et al. 2010; Monsalve 2013; Soyiri et al. 2013; Wanka et al. 2014). Dies bedeutet jedoch nicht, dass Ozon ein Schutzfaktor ist. 13 Studien finden einen direkten Zusammenhang zwischen erhöhter Mortalität und Morbidität von Atemwegserkrankungen und Ozon (Abbildung 6). Stieb et al. (2009) finden für sieben Städte in Kanada die stärkste Ozon-Wirkung bei einer Verzögerung um zwei Tage nach der höchsten Konzentration in der warmen Jahreszeit, stärker als allgemeine Atemwegserkrankungen sind Asthmatiker und COPD-Erkrankte betroffen. Feinstaub kann das ganze Jahr über höhere Konzentrationen erreichen (Ito et al. 2007), Hitze und Feinstaub können ihre Wirkung jedoch gegenseitig verstärken (Barnett et al. 2005; Lavigne et al. 2014). PM10 wird dabei häufiger untersucht als PM2,5. Die negative Wirkung

hängt vor allem von der Größe der Partikel und der damit einhergehenden Lungengängigkeit ein, das heißt, wie tief sie in durch den Atemtrakt in die Lunge eindringen können und wie lange sie dort verbleiben. Grobe Partikel bleiben in den oberen Atemwegen, feine und ultrafeine Partikel dagegen dringen bis in die Lunge ein und können sogar in den Blutkreislauf geraten, wo sie Entzündungen hervorrufen können (UBA 2009).

Abbildung 6: Anzahl der Morbiditätsstudien (2001 – 2018) mit Angaben zur Wirkung von Partikeln (PM10, PM2,5, TSP), Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Ozon (O₃) und Pollen auf Atemwegserkrankungen.



Erläuterungen: PM10, Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$ (particulate matter); PM2,5, Partikeln mit einem Durchmesser $\leq 2,5 \mu\text{m}$; TSP, Masse des Gesamtstaubes, auch Schwebstaub. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

2.2.8 Luftgetragene Allergene

Pflanzliche Partikel wie Sporen und Pollen können ebenfalls zu Problemen in den Atemwegen führen, dies ist jedoch meist durch ihre Allergene bedingt und nicht wie beim Feinstaub durch ihre Größe und Zusammensetzung (Abbildung 6). Eine Ausnahme können Gewitterereignisse, die das sogenannte Gewitter-Asthma auslösen können (Marks et al. 2001; Andrew et al. 2017; Thien et al. 2018). Sporen sind in der Regel so groß, dass sie nicht direkt lungengängig sind. Platzen sie jedoch auf, werden allergische Proteine freigesetzt, auf die das Immunsystem vieler Menschen reagiert und tränende Augen, Heuschnupfen und Atemschwierigkeiten auslöst. Vor allem allergische Asthmatiker und dabei wiederum Kinder sind betroffen (Höflich et al. 2016). Über die Verbindung von Pollen und ihre Verbreitung vor allem im Frühjahr und Sommer mit Atemwegsbeschwerden gibt es ebenfalls zahlreiche Studien. Weitere Studien untersuchen Einflüsse des Klimawandels auf das Pflanzenwachstum und die Pollenproduktion, inwieweit sich die Pollensaison verlängert oder die Allergenkonzentration erhöht. Stach et al. (2007) haben über einen zehnjährigen Zeitraum in Polen festgestellt, dass sich die Pollensaison durch einen früheren Start verlängert hat und das Maximum der Allergenkonzentration ebenfalls früher auftritt. Das Ende der Pollensaison dagegen verschiebt sich kaum. Die Lufttemperatur und Sonnenschein-

dauer ist in Polen direkt mit der täglichen Pollenkonzentration verbunden. Niederschlag, vor allem in der ersten Julihälfte reduziert die Konzentration und die Auswirkungen der Allergene für den Rest der Saison. Diese Studien haben jedoch keinen direkten Bezug zu gesundheitlichen Daten.

Studien mit gesundheitlichem Bezug zeigen kein eindeutiges Bild über den Einfluss von Pollen auf die Anzahl an Krankenhauseinweisungen oder Notaufnahme-Besuche. Drei der sechs Studien nennen keinen signifikanten Effekt, was darauf schließen lässt, dass die allergischen Reaktionen auf Pollen meist in einem Ausmaß verlaufen, die keine solche intensive medizinische Betreuung erfordern. Su et al. (2017) finden für Louisville, Kentucky, eine negative Wirkung von Gras- und Kräuterpollen auf Atemwegserkrankungen, Baum- und Krautschichten dagegen sind ein Schutzfaktor trotz der vorhandenen Pollen. Dies erklären Su et al. (2017) mit der Filterwirkung der Bäume gegenüber Luftbeimengungen wie Feinstaub und NO₂. Tosca et al. (2014) haben ebenfalls über zehn Jahre die Asthma-Exazerbationen bei Kindern im Zusammenhang mit meteorologischen Faktoren, Luftqualität und Pollen untersucht. Dabei stellen sie fest, dass Pollen zum ersten Maximum der Asthmaverschlimmerungen im Frühling beitragen (das zweite Maximum liegt im Herbst), ebenso wie eine erhöhte Konzentration an Luftbeimengungen.

2.3 Zusammenhang zwischen Wetter und psychischen Störungen

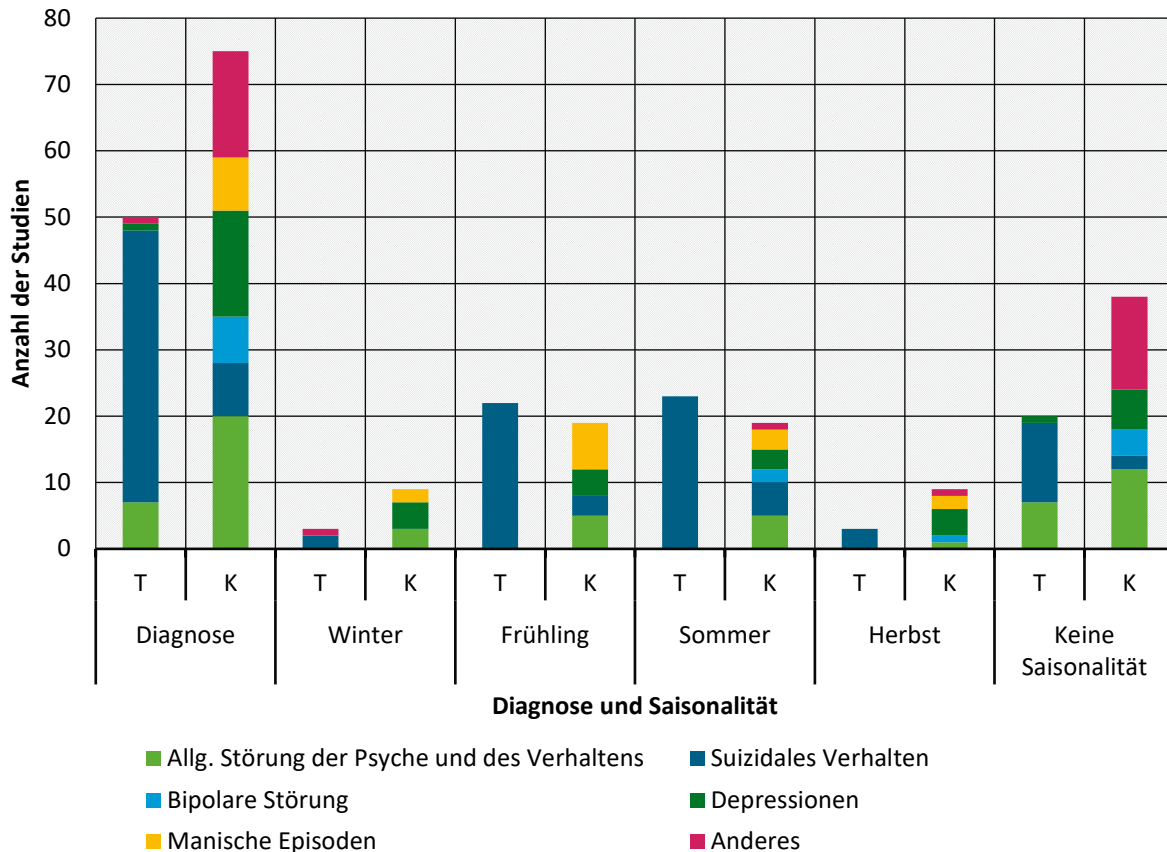
2.3.1 Saisonale Schwankungen

Die Mehrzahl der Studien untersucht den Zusammenhang von Erkrankungen der Psyche und des Verhaltens mit den Jahreszeiten. Von diesen Studien bestätigen 80 % die in dem Bereich allgemein bekannte Zunahme der Mortalitäts- und Morbiditätsfälle im Frühling und (Früh-)Sommer (Abbildung 7, Tabelle 6 und Tabelle A 4). Der Hoch- und Spätsommer verzeichnet meist bereits einen deutlichen Rückgang der Erkrankungen (García et al. 2009; Hanigan et al. 2012). Nur wenige Studien z. B. über Depressionen oder manischen Episoden geben zusätzlich oder als einziges Maximum den Herbst oder Winter an (Morken et al. 2002; Keller et al. 2005; Radua et al. 2010). Werden nur Studien zu Suiziden betrachtet, liegt die Prozentzahl der Studien mit der höchsten Rate im Frühling und Sommer bei fast 100 %. Nur vereinzelt werden zusätzlich zu Frühling oder Sommer ein zweites Maximum im Herbst (Partonen et al. 2004; Bakian et al. 2015) oder im Winter (Gajić et al. 2011) genannt. Eine Suizid-Studie aus Großbritannien von Page et al. (2007) dagegen nennt die höchste Suizidrate im Januar, vor allem am 1. Januar, der Zusammenhang mit den Januar gilt aber auch unabhängig von Neujahr. Zwei weitere Studien aus Großbritannien zu depressiven Stimmungen (Lyll et al. 2018) und Psychose nennen ebenfalls ein Maximum im Winter (Page et al. 2012; Lyll et al. 2018). Für Finnland finden Ruuhela et al. (2009) ebenfalls ein Maximum der Suizidrate im Winter.

Es gibt Unterscheidungen der Saisonalität je nach Krankheitsbild (Abbildung 7). Cassidy und Carroll (2002) finden in North Carolina einen Zusammenhang von rein manischen Episoden mit dem Frühling, gemischte Episoden, also bipolare Störungen, sind aber mit dem Sommer assoziiert. Eine neunjährige Studie aus Warschau, Polen, nennt das Maximum der Krankenhausaufnahmen aufgrund von manischen Episoden im Frühling, Sommer und der Mitte des Winters. Depressionen und bipolare Erkrankungen häufen sich zusätzlich zum Frühling auch im Herbst, aber nicht im Winter (Dominiak et al. 2015). García et al. (2009) geben für Spanien ebenfalls unterschiedliche saisonale Zusammenhänge je nach Krankheitsbild an: Die Notaufnahme und Krankenhaus-Besuche sind für Psychosen im Winter am höchsten, neurotische Störungen häufen sich im Frühling und Frühsommer, und affektive Störungen im Sommer und Herbst. Radua et al. (2010) unterscheiden in Barcelona, Spanien, bei den affektiven Störungen zwischen Episoden mit Melancholie, die im Winter am stärksten auftreten, und psychotischen Zuständen, die eher

im Frühling und Sommer vorkommen. Auch Morken et al. (2002) nennen für Norwegen eine Häufung der Krankenhausaufnahmen aufgrund von Depressionen im Herbst, welcher jedoch nur für Frauen gilt, und eine Häufung im Frühling geltend für Männer, Suizide dagegen haben ein einziges Maximum im April.

Abbildung 7: Studien (2001 – 2018) zur Saisonalität von psychischen Störungen angegeben als sign. erhöhte Mortalität / Morbidität im Vergleich zum Gesamtjahr, unterteilt in verschiedene Diagnosen, Mehrfachnennungen erlaubt.



Erläuterungen: T, Todesfall (Mortalität); K, krank (Morbidität). Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Damit kommt eine weitere Unterscheidung der saisonalen Schwankungen hervor: Unterschiede bei den Geschlechtern. In den Niederlanden gilt das Maximum der depressiven Verstimmungen im Herbst ebenfalls nur für Frauen, Männer haben depressive Verstimmungen eher im Sommer, das Minimum für beide Geschlechter ist im Winter (Huibers et al. 2010). In Großbritannien gilt das saisonale Auftreten von depressiven Verstimmungen mit einem gehäuften Auftreten im Winter nur für Frauen, bei Männern zeigt sich keine Saisonalität (Lyll et al. 2018). Generell scheinen affektive Störungen mit depressiven Verstimmungen und Melancholie weniger stark mit dem Frühling und Sommer assoziiert zu sein, ebenso wie Erkrankungen bei Frauen. Bipolare Störungen und gemischte Episoden kommen häufiger im Sommer als im Frühling vor. Am Stärksten ist der Zusammenhang mit Frühling und Sommer bei manischen Episoden und Suiziden, vor allem von Männern mit gewaltsamen Methoden. Als solche gelten beispielsweise das Springen aus großer Höhe oder vor einen Zug, Erhängen, Ersticken, Ertrinken und Selbstverletzungen mit scharfen Gegenständen. Dagegen sind nicht-gewaltsame Methoden (Vergiftung mit Medikamenten oder Drogen) seltener mit den Jahreszeiten verknüpft (Vyssoki et al. 2012; Vyssoki et al. 2014; Qi et al. 2015; Seregi et al. 2017). Die Studien, die keine Unterscheidung der verschiedenen Krankheitsbilder vornehmen, geben auch seltener eine Saisonalität an.

Tabelle 6: Morbiditätsstudien mit einer Datenreihe > 1 Jahr, Fallzahl > 1000 und mit Angaben zum saisonalen Auftreten von psychischen Erkrankungen (ohne suizidales Verhalten).

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Datenerhebung | Max. im Jahr | Min. im Jahr |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|--------------|--------------|
| Brandl et al. (2018) | Deutschland (Berlin) | 2008 – 2014 (22 672) | Ökologisch | Psych. Störungen; Notaufnahme | F, S | H, W |
| Dominiak et al. (2015) | Polen (Warschau) | 2002 - 2010 (2 326) | Ökologisch | Depressionen; KH-Aufnahme | F, H | |
| (García et al. 2009) | Spanien (Tarragona) | 2003 – 2005 (3 048) | Ökologisch | Psych. Störungen; Notaufnahme + KH | W, F, fS, H | S |
| (Kerr et al. 2013) | USA (Westen) | 1980 – 1999 (8 316) | Kohort | Depressionen; Umfrage | W | H |
| (Lyll et al. 2018) | Großbritannien | 2006 – 2010 (150 922) | Querschnitt | Depressive Stimmung; Stimmung | W | S |
| (Medici et al. 2016) | Dänemark | 1995 – 2012 (24 313) | Kohort | Manie; KH-Aufnahme | fS, S | W |
| Morken et al. (2002) | Norwegen | 1992 – 1996 (4 341) | Ökologisch | Depressionen, Manie; KH-Aufnahme | F, H | S, W |
| (O’Hare et al. 2016) | Irland | 2009 – 2011 (8 027) | Sonstiges | Depressionen; Umfrage | W | H |
| Parker et al. (2017) | Australien (New South Wales) | 2000 – 2014 (21 882) | Ökologisch | Manie; KH-Aufnahme | F | |
| (Shiue et al. 2016) | Deutschland | 2009 – 2011 (5 235 600) | Ökologisch | Psych. Störungen; KH-Aufnahme | F | |
| Szyszkowicz (2007) | Kanada (Edmonton) | 1992 – 2002 (15 556) | Ökologisch | Depressionen; Notaufnahme | F | |
| Szyszkowicz et al. (2016) | Kanada | 2004 – 2011 (118 602) | Case cross-over | Depressionen; Notaufnahme | w.J. | |
| (Williams et al. 2016) | Neuseeland | 1993 – 2009 (47 265) | Ökologisch | Selbstverletzung; KH-Aufnahme | S | W |

Erläuterungen: F, Frühling; fS, Frühlingsmonat; S, Sommer; H, Herbst; W, Winter; KH, Krankenhaus; w.J. warme Jahreszeit.

2.3.2 Effekte der Sonnenscheindauer und Strahlung

Die saisonalen Schwankungen mit der deutlichen Häufung psychischer Störungen im Frühling werden oft auf die zunehmende Tageslänge, die Sonnenscheindauer (SD) oder Solarstrahlung im Frühling zurückgeführt (Tabelle 7). Von den ausgewerteten Studien ist die Sonnenscheindauer oder Solar- bzw. Globalstrahlung (G) der am häufigsten untersuchte meteorologische Faktor (39 von 100 Studien). Von den 39 Studien finden 18 eine positive Korrelation, d. h., mit zunehmender Strahlung und SD tritt eine höhere Mortalität und Morbidität bei Menschen mit psychischen Störungen auf. Sechs der Studien nennen dagegen eine negative Korrelation, 14 Studien

finden keinen signifikanten Zusammenhang, eine Studie nennt die Sonnenscheindauer als signifikanten Prädiktor eines Modelles, gibt aber keine Information über die Richtung des Zusammenhangs mit Atemwegserkrankungen.

Tabelle 7: Auswahl umfangreicher Studien zu psychischen Erkrankungen und ihre Aussagen über Saisonalität und Korrelationen mit Sonnenscheindauer (SD) oder Globalstrahlung (G).

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild | Max (Min) | SD (Kontr. *) | Kommentar |
|----------------------------|------------------------------------|--|------------|----------------|-----------|---------------|---|
| Hiltunen et al. (2011) | Finnland (Ouli, Helsinki) | 1969 – 2003 (43 393) | Ökologisch | Suizid | F, S | ns | 15. Mai – 25. Juli höchste Rate, keine Korrelation mit T _a oder G in beiden Städten |
| Lambert et al. (2003) | Australien (Victoria) | 1990 - 1999 (5 706) | Ökologisch | Suizid | F, S (W) | s+ | Gewaltsame Methoden parallel zu SD |
| Makris et al. (2016) | Schweden | 1992 – 2003 (12 448) | Ökologisch | Suizid | F, S | s+ (ns) | SD nur abhängig von Jahreszeit sig. positiv korreliert, nicht unabhängig |
| Moore et al. (2018) | Schottland (Dundee) | 1968 – 2007 (685) | Ökologisch | Suizid | Juni | s+ (ns) | Saisonalität wird ns nach Kontrolle auf SD, und T _a |
| Müller et al. (2011) | Deutschland (Mittelfranken) | 1998 – 2005 (2 987) | Ökologisch | Suizid | F, S (W) | s+ | Sig. positive Korrelation mit T _a und G mit lag 0-1 Tage |
| Papadopoulos et al. (2005) | Griechenland | 1992 – 2001 (3 717) | Ökologisch | Suizid | fS | s+ / s- | SD lag0-4 Tage positiv korreliert, ab dem 6. Tag wird SD negativ korreliert |
| Törö et al. (2009) | Ungarn | 1995 – 2004 (4 918) | Ökologisch | Suizid | F, fS (H) | s+ | Nur leichte Saisonalität, positiv mit T _a und G, negativ mit Feuchte korreliert |
| Vyssoki et al. (2012) | Österreich | 1996 – 2006 (16 673) | Ökologisch | Suizid | F (W) | s+ | Höchste Rate im März-Mai, korreliert mit SD/Monat, gilt nur für gewaltsame Methoden |
| Vyssoki et al. (2014) | Österreich | 1970 – 2010 (69 462) | Ökologisch | Suizid | F, S (W) | s+ / s- (s+) | Starke Korrelation mit SD, nach Kontrolle auf Jahreszeit nur noch schwacher Effekt, ab lag14-60 Tage s- |
| White et al. (2015) | Griechenland, Australien, Norwegen | 1992 – 2001 1990 – 1998 1969 – 2009 (insg. 31 060) | Ökologisch | Suizid | F, S (W) | s+ (ns) | Gilt für alle drei Länder. Saisonalität durch Monat/Jahr, nicht durch SD oder G bedingt |

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild | Max (Min) | SD (Kontr. *) | Kommentar |
|------------------------|------------------|----------------------|---------------|---|-------------------------|---------------|--|
| Dominiak et al. (2015) | Polen (Warschau) | 2002 – 2010 (2 837) | Ökologisch | Depressionen, manisch e; gemischte Episoden | F, H F, S, W F, W | s+ | SD nur bei Untergruppen der bipolaren/depressiven Erkrankungen signifikant, Saisonalität jedoch bei allen PS |
| Medici et al. (2016) | Dänemark | 1995 – 2012 (24 313) | Kohort-Studie | Manische Episoden | F, S (W) | s+ | Maximum im August mit SD und UV-Strahlung |

*Kontrolle der Korrelation mit SD auf Monate im Jahr zum Ausschluss des saisonalen Effekts.

Erläuterungen: F, Frühling; fS, Frühsommer; S, Sommer; H, Herbst; W, Winter; s+, signifikant positive Korrelation; s-, sign. negative Korrelation; ns, nicht signifikante Korrelation, SD, Sonnenscheindauer; G, Globalstrahlung, T_a, Lufttemperatur; PS, psychische Störungen.

Vyssoki et al. (2014) haben in Österreich festgestellt, dass eine positive Korrelation von SD mit Suiziden für den Tag der Tat und die vergangenen 10 Tage (lag 0 – 10 Tage) gilt, hält die Sonnenscheindauer jedoch länger an (lag 14 – 60 Tage) wird die Korrelation mit Suiziden negativ. Länger anhaltende erhöhte Sonnenscheindauer ist also ein Schutzfaktor. Dies könnte auch die abnehmende Häufigkeit im Hochsommer erklären. Eine ebenso negativ werdende Korrelation finden (Papadopoulos et al. 2005) für Griechenland bereits ab dem sechsten Vortag. Die Strahlung in den ersten vier Tagen jedoch erhöht pro 1 MW/m² das Risiko für einen Suizid um 3 %.

Die Studien, die eine negative Assoziation von SD oder G gefunden haben, untersuchen, bis auf eine, keine Suizide, sondern das allgemeine Stimmungsbild, Wohlbefinden oder Stimmungsschwankungen bei bipolaren und depressiven Erkrankten und haben häufiger Eigenangaben in Interviews oder Umfragen als Grundlage. In diesen Studien wird gezeigt, dass „besseres Wetter“, angenommen mit vermehrtem Sonnenschein, weniger Wolken und Regen, die allgemeine Stimmung hebt und das Wohlbefinden steigert, depressive Stimmungen dagegen im Winter mit der Kälte und der Dunkelheit zunehmen. Dieser Umstand widerspricht damit jedoch den Suizid-Studien und vielen Aussagen zur Wirkung von erhöhter Temperatur auf den psychischen Zustand (siehe auch Kapitel 4.3). Bei Depressionen wird zwischen melancholischen Verstimmungen, die gehäuft im Herbst und Winter auftreten, und manischen oder psychotischen Episoden unterschieden, die im Frühjahr und Sommer verstärkt vorkommen (Radua et al. 2010).

Um der Frage nach dem Grund des Zusammenhanges von psychischen Erkrankungen, Frühling und Strahlung auf den Grund zu gehen, suchen viele Autoren im Bereich der hormonellen Schwankungen im Körper (Löhmus 2018). Serotonin ist ein Neurotransmitter, der auch als das „Glückshormon“ bekannt ist. Dieser hat Einfluss auf die Stimmung, wirkt beruhigend und hemmt Angst und Aggressivität. Depressionen werden häufig mit einem Mangel an Serotonin im Gehirn in Zusammenhang gebracht, daher wird Serotonin in einigen Antidepressiva verwendet. Der Serotonin-Transporter, der für die Wiederaufnahme des Serotonins aus dem synaptischen Spalt in den Intrazellularraum verantwortlich ist und damit die Wirkung des Serotonins im Gehirn beendet, zeigt jedoch eine saisonale Abhängigkeit mit einem Minimum im Frühsommer und eine negative Korrelation mit der täglichen Sonnenscheindauer (Praschak-Rieder et al. 2008; Ruhé et al. 2009; Kalbitzer et al. 2010; Makris et al. 2016). Dies erscheint widersprüchlich zu der erhöhten Mortalität und Morbidität von psychischen Erkrankungen im Frühling und Frühsommer. Der Wirkungsmechanismus des Serotonins speziell auf suizidales Verhalten ist noch nicht geklärt (Praschak-Rieder et al. 2008).

Viele Studien haben den Zusammenhang von Mortalität bzw. Morbidität, Jahreszeiten und Sonnenscheindauer genauer untersucht. Dabei hat sich ein Konflikt ergeben, dem wiederum weitere Studien versuchen nachzugehen (Vyssoki et al. 2012; White et al. 2015; Makris et al. 2016): Es ist fraglich, ob die deutliche Saisonalität stärker von der Jahreszeit, also den Monaten im Jahr oder von der Strahlung beeinflusst und ob einer der Faktoren nur durch die direkte Abhängigkeit zum anderen als signifikant dargestellt wird.

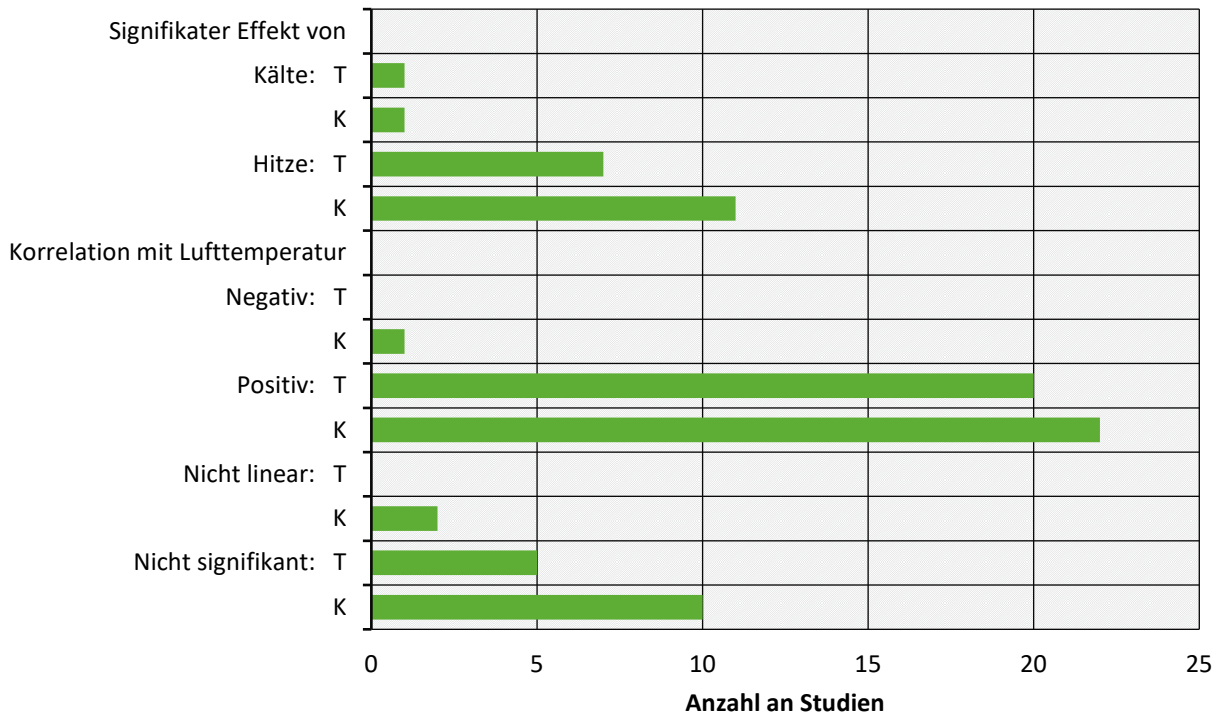
Drei der Studien, die eine positive Korrelation der Sonnenscheindauer oder Globalstrahlung benennen, beobachten, dass nach der Kontrolle auf die Monate im Jahr, die Korrelation nicht mehr signifikant ist (White et al. 2015; Makris et al. 2016; Moore et al. 2018). Das bedeutet, dass die jahreszeitlichen Schwankungen nicht durch die zunehmenden Sonnenstunden im Frühling erklärt werden und es andere, wahrscheinlich, nicht-meteorologische Faktoren gibt, die hauptsächlich für das Maximum im Frühjahr verantwortlich sind. Bei Vyssoki et al. (2014) in Österreich bleibt die Korrelation mit SD nach der Kontrolle auf die Monate im Jahr zwar signifikant, die Effektgröße ist jedoch nur noch schwach.

Eine Studie in Schweden hat, um den Effekt des Serotonins auf suizidales Verhalten zu untersuchen, Suizid-Opfer danach unterschieden, welche und ob sie vorher Antidepressiva-Medikamente bekommen haben (Makris et al. 2016). Es stellte sich heraus, dass die Gruppe mit Antidepressiva, die die Serotonin-Konzentration im Gehirn erhöhen (selektive Serotonin-Wiederaufnahmehemmer, SSRIs) mit dem Zeitpunkt ihres Suizides stärker als alle anderen Gruppen mit der Sonnenscheindauer korrelierten und die Korrelation auch nach der Kontrolle auf die Jahreszeiten stabil blieb, während die anderen nicht mehr mit SD assoziiert waren.

2.3.3 Temperatureffekte

Die steigende Lufttemperatur im Frühjahr wird neben der Sonnenscheindauer ebenfalls als Erklärung für die Zunahme an psychischen Erkrankungen und Suiziden angegeben (Tabelle 8). Die Untersuchung des Temperatureffektes zeigt aber darüber hinaus vor allem Effekte während heißer Tage und Hitzewellen. Von den ausgewählten Studien haben ca. 60 Studien die Wirkung der Lufttemperatur auf psychische Erkrankungen untersucht. Davon geben 18 Studien an, dass Hitze (verschiedene Definitionen, z. B. $T_a > 95$. Perzentil) zu einer Verschlechterung der psychischen Störung führt (Abbildung 8). Länger andauernde Hitze während einer Hitzewelle zeigt vor allem deutlich erhöhte Krankenhausaufnahmen und Todesfälle aufgrund von psychischen Erkrankungen (Rey et al. 2007; Rocklöv et al. 2014; Oudin Åström et al. 2015), jedoch meist keine erhöhte Suizidrate (Morali et al. 2008). Eine Studie, die den Effekt von Hitzewellen auf die Mortalität verschiedener Ursachen im Vergleich zwischen Rom und Stockholm untersucht, zeigt, dass die Wirkung auf psychisch Erkrankte in Stockholm mit einem Anstieg der täglichen Mortalität um 33 % während einer Hitzewelle stärker ist als in Rom mit immerhin noch 21 % erhöhter Mortalität (Oudin Åström et al. 2015). Als mögliche Gründe für die Wirkung hoher Temperaturwerte werden eine schlechtere Schlafqualität (Mullins und White 2018), die durch Antipsychotika herabgesetzte körperliche Thermoregulation (Löhmus 2018) und eine stärkere Wirkung von Alkohol und Medikamenten genannt (Murage et al. 2017). Bei Studien, die die täglichen oder wöchentlichen Lufttemperaturwerte (oder apparent temperature, AT) als Parameter untersucht haben, zeigt sich ebenfalls ein deutlicher Hinweis auf die schädigende Wirkung steigender und hoher Temperaturwerte: eine deutliche Mehrzahl von 42 Studien nennt eine positive Korrelation, nur eine Studie gibt eine negative Korrelation an. Die positive Korrelation der Lufttemperatur mit psychischen Erkrankungen wird sogar von Page et al. (2012) bestätigt, obwohl die saisonale Untersuchung der Mortalität aufgrund von Psychosen in Großbritannien ein Maximum im Winter anzeigt. Die Korrelation wurde vom Einfluss der Jahreszeiten bereinigt und gibt ganzjährig eine schädigende Wirkung wärmerer Temperaturwerte an.

Abbildung 8: Studien (2001 – 2018) mit Angabe eines statistisch signifikanten Effekts von Kälte oder Hitze sowie Korrelation mit ansteigender oder fallender Lufttemperatur auf die Mortalität oder Morbidität von psychischen Erkrankungen.



Erläuterungen: T, Todesfälle (Mortalität); K, krank (Morbidität). Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle 8: Übersicht der Studien zu psychischen Erkrankungen mit Angaben zur prozentualen Veränderung mit steigender Lufttemperatur oder AT (apparent temperature).

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild (Mortalität/Morbidität) | Veränderung mit steigender T_a /AT | Kommentar |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------|---|--|--|
| Grijbovski et al. (2013) | Kasachstan (Astana) | 2005 – 2010 (685) | Ökologisch | Suizid (Mortalität) | 2,1 % pro 1 °C AT | Max im Sommer, AT als Erklärung |
| Hansen et al. (2008) | Australien (Adelaide) | 1993 – 2006 (171 614) | Ökologisch | Psych. Erkrankungen (KH und Mortalität) | 7,3 % Hitzewelle vs. Nicht-Hitzewelle | Hitzeschwelle bei 27 °C Mortalität nur bei Älteren ansteigend |
| Oudin Åström et al. (2015) | Italien (Rom), Schweden (Stockholm) | 2000 – 2008 (6 149) | Ökologisch | Psych. Störungen (Mortalität) | 21 % Rom, 33 % Stockholm, während Hitzewelle | V.a. Borderline, Frauen und Ältere höheres Risiko |
| Page et al. (2012) | Großbritannien (England) | 1998 – 2007 (22 562) | Ökologisch | Psychose, Demenz, Sucht (Mortalität) | 4,9 %, $T_a > 93.$ Perzentil Hitzeschwelle 18 °C | Jüngere und Drogensüchtige haben höheres Risiko |

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild (Mortalität/Morbidität) | Veränderung mit steigender T _a /AT | Kommentar |
|------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------|--|---|--|
| Page et al. (2007) | Großbritannien (Wales) | 1993 – 2003 (53 460) | Ökologisch | Suizid (allg.), gewaltsame Meth. (Mortalität) | 3,8 % und 5 % pro 1 °C bei T _a > 18°C | Max im Winter, unab-häng. von Jahres-zeit ist Korrelation mit T _a s+ |
| Williams et al. (2015) | Neuseeland | 1988 – 2007 (9 984) | Ökologisch | Suizid (Mortalität) | 1,8 % pro 1 °C | Tages-Anomalie im Vergleich zum Durchschnitt |
| Nitschke et al. (2007) | Australien (Adelaide) | 1993 – 2006 (184 982) | Ökologisch | Psych. Erkrankungen (Mortalität + KH) | 7 % KH während Hitzewelle | Mortalität steigt ebenfalls geringfügig an, v.a. bei Älteren |
| Ding et al. (2016) | Australien (New South Wales) | 2006 – 2008 (53 144) | Sonstiges | Stress, Leistungsdruck; Depressionen, Angst (Symptome) | 0,2 % pro 1 °C | Leistungsdruck steigt, keine Korrelation mit Depressionen und Angst |
| Noelke et al. (2016) | USA | 2008 – 2013 (1,9 Mio) | Querschnitt | Emotionales Wohlbefinden (Symptome) | 1,6 % bei T _a 21 - 27°C, 4,4 % bei T _a > 32°C | Vergleichstemperatur: 10 – 16 °C T _a < -7 °C 3,1 % Verbesserung |
| Williams et al. (2016) | Neuseeland | 1993 – 2009 (47 265) | Ökologisch | Selbstverletzung (KH-Aufnahme) | 0,8 % pro 1 °C | Tages-Anomalie Nach Kontrolle auf SD nicht mehr signifikant |
| Williams et al. (2012) | Australien (Adelaide) | 1993 – 2009 (k. A.) | Ökologisch | Psych. Störungen (Notaufnahme) | 0,3 % pro 1 °C T _{a,max} | Hitzeschwelle 34 °C T _{a,max} (22 °C T _{a,min}), steigt ab extremer Hitze > 40 °C nicht mehr |

Erläuterungen: k. A., keine Angabe; AT apparent temperature, T_a, Lufttemperatur; s+, signifikant positive Korrelation; T_{a,min}, Minimum der Lufttemperatur; T_{a,max}, Maximum der Lufttemperatur; s+, signifikant positive Korrelation; KH, Krankenhaus(-aufnahme).

Eine umfangreiche Untersuchung der nächtlichen Lufttemperatur in London über 23 Jahre zeigt, dass heiße Nächte, vor allem, wenn sie auf einen heißen Tag folgen, eine erhöhte Mortalitätsrate bei Menschen mit psychischen Störungen zu Folge haben.

Nächte, die kühler sind als im Durchschnitt erwartet, senken die Mortalität von psychisch Erkrankten (Murage et al. 2017). Nur zwei Studien geben eine negative Wirkung von Kälte an. In den USA bezieht sich dies auf die kognitive Leistung von älteren Veteranen, die einen U-förmigen Zusammenhang mit der Temperatur aufzeichnen mit einem Optimalbereich zwischen 10 °C und 15 °C (Dai et al. 2016). In Schweden zeigen sowohl Hitze als auch Kälte eine negative Wirkung, die Mortalität von Personen mit psychischer Vorerkrankung steigt jeweils deutlich an (Rocklöv et al. 2014). Die negative Korrelation mit der täglichen Lufttemperatur bezieht sich auf Krankenhausaufnahmen mit einem klinischen Subtyp der Depression mit melancholischen Merkmalen in Barcelona (Radua et al. 2010). Mehrere Subtypen von psychischen Störungen wie Persönlichkeitsstörungen, Schizophrenie und nichtorganische Schlafstörungen zeigen in Deutschland ein

Maximum der Krankenhausaufnahmen bei kühlen bis kalten thermischen Bedingungen (Physiologisch Äquivalente Temperatur PET zwischen - 10 °C und + 10 °C), jedoch zum Teil eine Abnahme sowohl bei kälteren als auch wärmeren Bedingungen (Shiue et al. 2016).

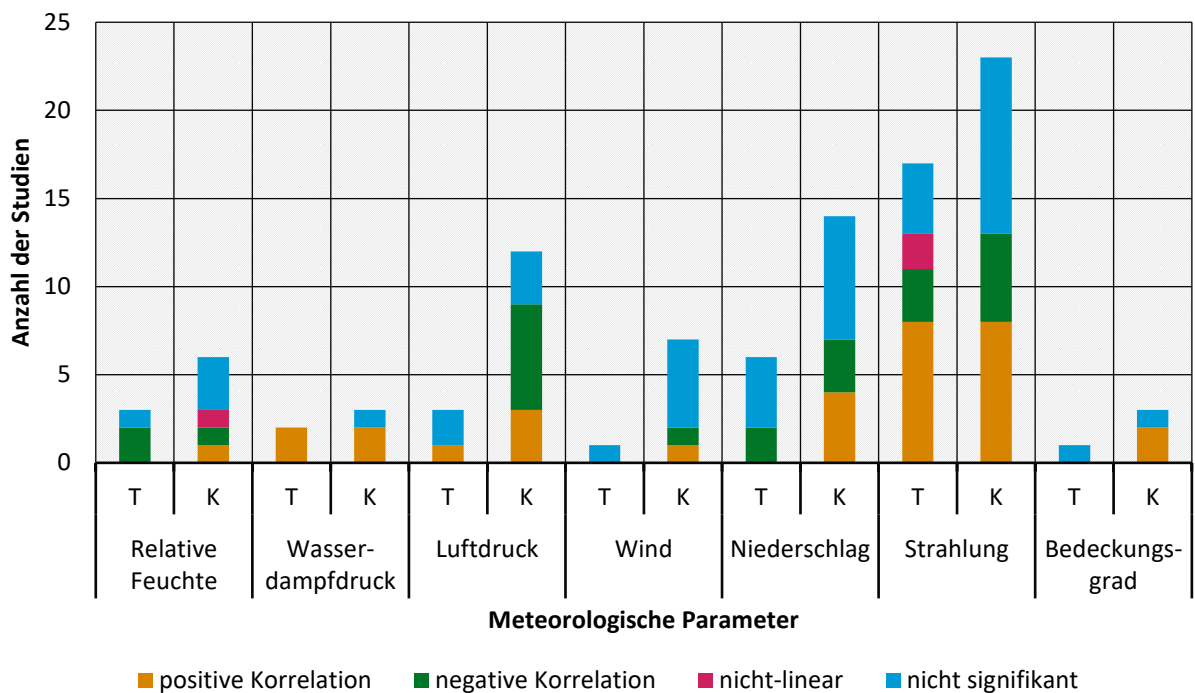
Gegen eine negative Wirkung von Kälte spricht allerdings die ausgeprägte Saisonalität mit dem Minimum der Erkrankungen im Winter. In Deutschland wurde eine signifikant niedrigere Besucherzahl der Notaufnahme eines psychiatrischen Krankenhauses während Frosttagen gefunden (Brandl et al. 2018). In Finnland sinkt die Suizidanzahl kontinuierlich mit einer Abnahme der Temperatur, je stärker der Temperatur-Abfall von einem Tag zum nächsten, desto geringer ist die Suizidrate (Hiltunen et al. 2014).

Einige der Analysen haben eine prozentuale Veränderung der Mortalität oder Morbidität von psychischen Erkrankungen untersucht (Tabelle 8). Die Zahlen variieren für ein Ansteigen der Morbidität zwischen 0,2 %, 0,3 % bis 0,8 % pro Zunahme von 1 °C und gehen bis zu einem Anstieg der KH-Aufnahmen während einer Hitzewelle um 7 %. Die Mortalität steigt um ca. 2 % pro 1 °C, über einer Schwelle von 18 °C steigen die Suizide in Großbritannien um 3,8 %, die gewalt-samen Methoden sogar um 5 % pro 1 °C weitere Zunahme der Lufttemperatur.

2.3.4 Andere Wettereinflüsse

Meteorologische Einflüsse wie Luftdruck, Luftfeuchte, Niederschlag, Wind und Bedeckungsgrad wurden in einigen Studien ebenfalls untersucht (Abbildung 9, Tabelle A 5 und Tabelle A 6 für Suizide). Die Luftfeuchte, ausgedrückt als Wasserdampfdruck zeigt einen eindeutigen negativen Einfluss hoher Feuchtwerte auf psychische Erkrankungen auf, insgesamt sind es jedoch nur vier Studien, die diesen Parameter untersucht haben, drei davon bestätigen die positive Korrelation.

Abbildung 9: Anzahl der Studien (2001 – 2018) zu Korrelationen des Luftdrucks, der Feuchte, Niederschlag und Bedeckung auf die Mortalität (T) und Morbidität (K) aufgrund von psychische Erkrankungen.



Erläuterungen: T, Todesfall (Mortalität); K, Krank (Morbidität). Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Ding et al. (2016) geben für Australien ein um 0,5 % steigendes Stresslevel (Kessler Psychologische Stress-Messung, K10), wenn der Wasserdampfdruck über das 99. Perzentil steigt. Qi et al. (2015) nennen ebenfalls für Australien eine positive Korrelation, diese ist jedoch nur in der nördlichen Stadt Darwin signifikant, die bereits in einer tropischen Klimaregion liegt.

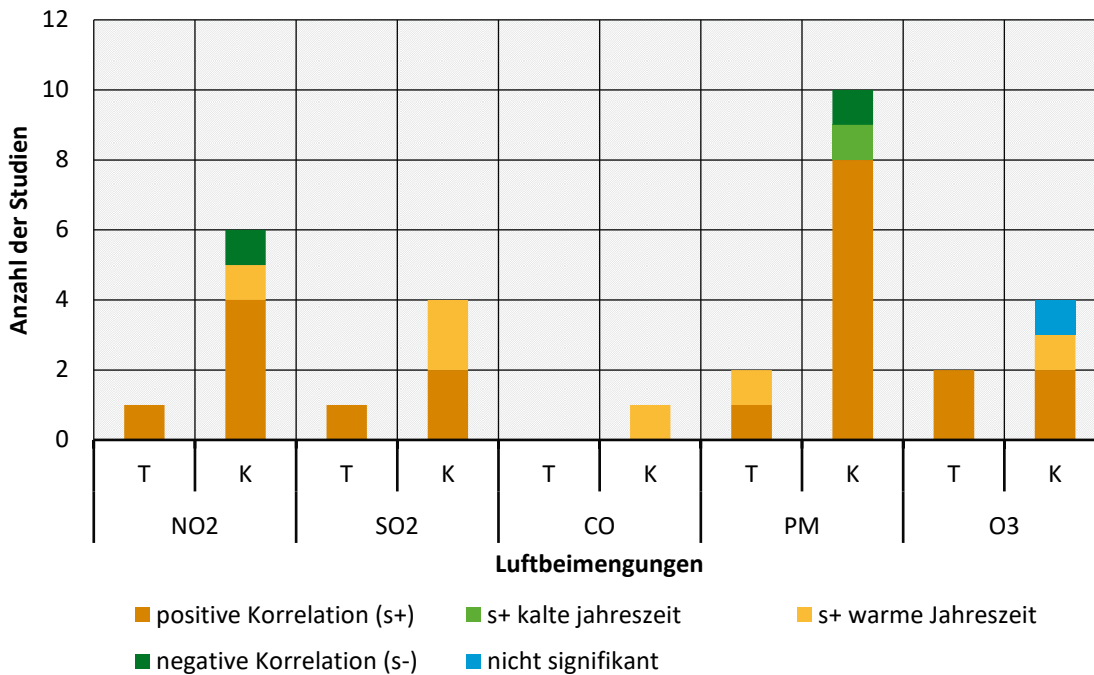
Eine Studie zur nächtlichen Wärmebelastung zeigte neben dem Temperatureffekt auch, dass eine Kontrolle auf die spezifische Feuchte den nächtlichen Wärmeeffekt reduzierte, das bedeutet, dass die Feuchte einen Teil zur Wirkung heißer Nächte beiträgt (Murage et al. 2017). Die Untersuchungen zur relativen Feuchte sind weniger eindeutig, dieses Temperaturmaß ist aufgrund der Abhängigkeit mit der Lufttemperatur jedoch nicht so gut geeignet (siehe auch Kapitel 2.2.3). Die Ergebnisse für Luftdruck sind nicht eindeutig: Vier Studien geben eine positive Korrelation an, sechs Studien jedoch eine negative Korrelation, fünf weitere finden kein signifikantes Ergebnis.

Die untersuchten Krankheitsbilder geben nur wenig Anhaltspunkte: keine der negativen Korrelationen beziehen sich auf Suizide, sondern auf alle psychischen und bipolaren Störungen, sowie auf Depressionen. Zwei der vier Untersuchungen mit positiver Korrelation als Ergebnis haben jedoch Suizide und Suizid-Versuche analysiert, die anderen beiden untersuchen allgemeine psychische und affektive Störungen. Ob daraus eine erhöhte Gefährdung durch Suizid an Tagen mit hohem Luftdruck besteht, ist anhand der geringen Anzahl an Studien dennoch nicht abschließend zu sagen. Hiltunen et al. (2012) haben in Finnland einen Unterschied zwischen Männern und Frauen entdeckt: ein geringer Luftdruck scheint eher eine Belastung für Männer zu sein, ein hoher Luftdruck jedoch für Frauen. Beim Niederschlag stehen vier positive Korrelationen (Allgemeine Stimmung, Depressionen, bipolare Episoden) fünf Studien mit negativer Korrelation (Suizid, Panik, Angst, Depressionen) gegenüber, weitere elf kommen zu keinem signifikanten Ergebnis. Beim Bedeckungsgrad geben zwei Studien einen positiven Einfluss sonniger, wolkenloser Tage an, diese beziehen sich auf allgemeine psychische und bipolare Störungen. Untersuchungen über die Windgeschwindigkeit als Einflussgröße zeigen keinen Effekt auf psychische Erkrankungen.

2.3.5 Effekt von Luftbeimengungen

Partikel und Gase in der Luft können nicht nur auf die Atemwege, sondern auch auf die Psyche wirken. Stickstoffdioxide (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), Kohlenmonoxid (CO), Feinstaub (PM₁₀, PM_{2,5}), und Ozon (O₃) werden in einigen Untersuchungen als Belastungsfaktor vor allem bei Suiziden (drei Mortalitätsstudien), Depressionen und Angststörungen (acht Morbiditätsstudien), psychischer Stress und allgemeinen psychischen Störungen (jeweils eine Morbiditätsstudie) genannt (Abbildung 10, Tabelle A 7). Vor allem NO₂ und Feinstaub werden öfter untersucht und fast alle Ergebnisse sind mit einer positiven Korrelation verbunden. Ausnahme ist eine Studie, die den Effekt in vier verschiedenen Ländern untersucht hat: In Finnland und Deutschland konnten keine signifikante Wirkung von Luftbeimengungen auf Depressionen gefunden werden, in den Niederlanden besteht eine positive, in Norwegen jedoch eine negative Korrelation (Zijlema et al. 2016). Die Ergebnisse zu den anderen Luftbeimengungen sind eindeutig, es haben sich jedoch Unterschiede in dem Zeitpunkt der größten Wirkung und bei den Geschlechtern ergeben: Eine Untersuchung in sechs kanadischen Städten findet einen signifikanten Effekt von O₃, SO₂ und NO auf Notaufnahme-Besuche depressiver Personen nach der Kontrolle auf Jahreszeiten, Temperatur und Luftfeuchte nur noch im warmen Halbjahr, im Winter wirkt PM_{2,5} jedoch am stärksten (Szyszkowicz 2007; Szyszkowicz et al. 2009). Ein weiterer Unterschied ist, dass SO₂ nur bei Frauen mit einer erhöhten Anzahl Notaufnahme-Besuche assoziiert wird, höhere PM_{2,5}-Werte jedoch nur mit der Morbidität von Männern, während O₃ auf beide Geschlechter einen negativen Effekt hat (Szyszkowicz et al. 2016).

Abbildung 10: Studien (2001 – 2018) mit Aussagen zur Korrelation von Luftbeimengungen mit der Mortalität (T) und Morbidität (K) aufgrund von psychischen Störungen.



Erläuterungen: T, Todesfall (Mortalität); K, Krank (Morbidität); NO₂, Stickstoffdioxid; SO₂, Schwefeldioxid; CO, Kohlenmonoxid; PM, Feinstaub (PM10 und PM2,5); O₃, Ozon. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Casas et al. (2017) bestätigt in Belgien den stärkeren Effekt der Luftbeimengungen auf Suizide im Sommer. Eine Studie in Boston, USA, findet dagegen einen Effekt von PM_{2,5} auf das psychische Stressempfinden (Perceived Stress Scale PSS) älterer Männer, dieser gilt jedoch nur im Winter (Mehta et al. 2015). Ein Unterschied bei den Krankheitsbildern ergab sich bei einer Analyse von Depressionen, Angststörungen und Medikamentennutzung wie Antidepressiva in Spanien: während PM₁₀ und NO_x Depressionen und die Medikamentennutzung verstärkten, zeigt sich kein Effekt auf Angststörungen (Vert et al. 2017).

2.4 Zusammenhang zwischen Wetter und ischämischen Herzerkrankungen

2.4.1 Zusammenfassung der Vorläuferstudie

Im Projekt „Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland“ des Umweltbundesamtes wurde eine Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf kardiovaskuläre Erkrankungen (KVK) für die Jahre 2001 – 2012 durchgeführt (Zacharias 2012). Kardiovaskuläre Herzkrankheiten sind in Deutschland und in vielen anderen Ländern die häufigste Todesursache, die chronischen ischämischen Herzkrankheiten stehen in Deutschland auf Platz eins, der akute Myokardinfarkt (Herzinfarkt) und die Herzinsuffizienz folgen auf Platz zwei und drei. Besonders ältere Menschen sind von diesen Krankheitsbildern betroffen (Destatis 2017).

Das Ergebnis der genannten Literaturstudie zeigt deutlich den Einfluss des Wetters sowohl auf die Mortalität als auch Morbidität von kardiovaskulären Herzkrankheiten (KVK). Saisonal ist eine starke Winter-Übersterblichkeit zu erkennen, auch das Maximum der Morbidität liegt im Winter (Zacharias 2012). Dies zeigt sich auch in Verbindung dieser Erkrankungen mit der Lufttemperatur: Eine Mehrzahl der Studien bestätigt einen signifikanten Kälteeffekt. Dieser wirkt

vor allem durch eine erhöhte Vasokonstriktion (Verengung der äußeren Blutgefäße), was zu einem erhöhten Blutdruck führt. Dieser ist das Hauptrisiko vieler kardiovaskulärer Erkrankungen. Der Kälteeffekt auf kardiovaskuläre Erkrankungen zeigt sich meist stärker als in der Gesamtmortalität oder -morbidität, mit einer Steigerung der KVK-Mortalität um 1,7 % pro 1 °C Temperaturabnahme in europäischen Städten (Analitis et al. 2008). Doch auch die Hitze hat eine belastende Wirkung auf das Herz-Kreislaufsystem, fast ebenso viele Studien belegen dies. Flüssigkeitsmangel und Dehydrierung durch starkes Schwitzen erhöht die Blutviskosität und das Thromboserisiko (Cheng und Su 2010). Der sommerliche Hitzeeffekt wird für Europa mit bis zu 3 % pro 1 °C steigender KVK-Mortalität angegeben (Baccini et al. 2008). Auch Temperaturanstiege im Sommer sind schädlich für Herzranke (Kysely und Kriz 2003; Messner 2005; Plavcová und Kysely 2014), andererseits zeigt eine Temperaturabnahme von mehr als 3 °C zum Vortag ebenfalls eine signifikante Zunahme von Herzinfarkten und Schlaganfällen (Chen et al. 2008; Yang et al. 2009). Auch innertägliche Temperaturschwankungen zeigen einen Effekt auf KVK, drei Studien bestätigen den ungünstigen Effekt einer großen täglichen Temperaturspannweite (Kan und Chen 2003; Liang et al. 2008; Lee et al. 2010). Der Effekt der thermischen Bedingungen auf kardiovaskuläre Herzkrankheiten ist damit gut belegt und gilt als die wichtigste Einflussgröße der meteorologischen Faktoren (Zacharias 2012).

Dem Luftdruck wird ebenfalls eine Wirkung auf kardiovaskuläre Erkrankungen zugeschrieben, wobei diese hauptsächlich einige Subtypen der KVK betrifft (Zacharias 2012). So wird von einem negativen Einfluss von Tagen mit geringem Luftdruck auf tiefe Venenthrombose und Aortenrupturen berichtet (Brown et al. 2009). Eine rasche Druckänderung mit einer Zu- oder Abnahme von mindestens 10 hPa im Vergleich zum Vortag hat vor allem auf Subarachnoidalblutungen einen belastenden Einfluss (Landers et al. 1997; Buxton et al. 2001; Setzer et al. 2007). Der Wirkungsmechanismus des Luftdruckes scheint aber noch nicht abschließend geklärt zu sein (Zacharias 2012).

Weitere meteorologische Faktoren wie die Luftfeuchte, Wind und Niederschlag haben keinen eigenen systematisch nachweisbaren Effekt auf kardiovaskuläre Erkrankungen, allerdings können sie den Effekt der thermischen Bedingungen verstärken. So wirkt eine hohe Luftfeuchte im Sommer zusammen mit hoher Lufttemperatur besonders belastend (Michelozzi et al. 2009). Niederschlag und Wind können mit einem Wetterwechsel und einer vorbeiziehenden Kaltfront einher gehen, die folgende Abkühlung ist jedoch wieder der Haupteffekt auf die KVK (Zacharias 2012). Eine geringe Sonnenexposition kann zu einem Mangel an Vitamin D und einer kardiovaskulären Belastung führen (Zittermann und Gummert 2010), andere Studien konnten aber keine Bestätigung dieses Zusammenhangs finden (Lee et al. 2008; Brown et al. 2009; Goggins et al. 2012).

Luftbeimengungen wie Feinstaub, Stickstoffdioxide, Schwefeldioxid und Ozon können auch zu einer Erhöhung des Blutdrucks führen und damit eine zusätzliche Belastung sein (Hoffmann et al. 2011). Die gesundheitliche Wirkung von Luftbeimengungen ist oft wetter- und temperaturabhängig (Bell et al. 2004).

Im oben genannten Projekt „Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland“ wurde von Koppe et al. (2013a) ebenfalls eine retrospektive Analyse durchgeführt, die den Einfluss des Wetters auf ischämische Herzerkrankungen in Deutschland untersucht hat. Die Analyse deckte den Zeitraum 2001 – 2010 ab und bestätigt mit ihren Ergebnissen die Resultate anderer Studien speziell für Deutschland. Die trendbereinigten Daten zeigen einen typischen V-förmigen Zusammenhang der thermischen Umwelt mit den ischämischen Herzerkrankungen. Vor allem bei der Mortalität zeigte sich oberhalb des optimalen Temperaturbereiches von 15 °C – 19 °C ein fast linearer Anstieg. Hitzewellen stellen eine besondere Belastung dar, das Mortalitätsrisiko steigt um 10 %

während der Dauer der Hitzewelle an. Unterhalb des Optimums ist die Mortalität ebenfalls erhöht und steigt mit der zunehmenden Kälte an. Dieser Effekt scheint aber hauptsächlich durch den Jahresgang bedingt zu sein. Eine Kontrolle auf die Jahreszeiten zeigt, dass außerhalb des Wintereffekts kein erhöhtes Risiko aufgrund niedriger Temperaturwerte für ischämische Herzkrankheiten vorliegt. In Morbiditätsdaten (Krankenhauseinlieferungen) wurde kein signifikanter Einfluss der meteorologischen Faktoren gefunden.

2.4.2 Neue Erkenntnisse

Es sind zahlreiche Studien und Review-Artikel in den Jahren 2013 – 2018 zum Effekt des Wetters auf kardiovaskuläre Erkrankungen erschienen. Um neue Erkenntnisse in diesem Bereich zu finden, wurde in den bereits in Kapitel 2.1 erwähnten Literaturdatenbanken nach aktuellen Review-Artikeln und Meta-Analysen gesucht (es fand keine systematische Literaturrecherche nach und Auswertung von Originalstudien statt). Viele davon bestätigen die bereits bekannten Einfluss- und Effektgrößen meteorologischer Parameter. Vor allem die Wirkung thermischer Umweltbedingungen wird untersucht. Die Exposition gegenüber hohen Temperaturwerten ist eine Belastung für das Herz-Kreislaufsystem und erhöht die Mortalität, dies bestätigen mehrere umfangreiche Review-Artikel und Studien der letzten Jahre. Eine umfangreiche Literaturstudie gibt in der Meta-Analyse eine erhöhte KVK-Mortalität im Zusammenhang sowohl nach einer Hitze als auch nach einer Kälte-Exposition an (Bunker et al. 2016). Eine Hitzewelle erhöht das Mortalitätsrisiko vor allem aufgrund eines Herzinfarktes signifikant, was auch das Review von Sun et al. (2018) bestätigt.

Kontroverse Resultate gibt es weiterhin zum Einfluss der Lufttemperatur auf die Morbidität aufgrund von kardiovaskulären Erkrankungen. Die Meta-Analysen von Song et al. (2017) und Phung et al. (2016) können keine Assoziation einer täglicher Hitze-Exposition mit Morbidität bestätigen. Auch das Review von Arbuthnott und Hajat (2017), nennt für Großbritannien kein zunehmendes Myokardinfarkt-Risiko während einer Hitzewelle, im Sommer 2003 ging die Zahl der Arztbesuche aufgrund eines Myokardinfarkt und seinen Folgen sogar zurück. Das Review von Sun et al. (2018) nennt jedoch eine erhöhte Anzahl an Krankenhausaufnahmen aufgrund eines Herzinfarktes an Tagen mit steigender Temperatur und den darauffolgenden Tagen. Eine Hitzewelle führt ebenfalls zu einer stärkeren Morbidität, diese steigt um 2,2 % pro 1 °C Lufttemperaturzunahme während einer Hitzewelle (Phung et al. 2016).

Neuere Erkenntnisse gibt es vor allem im Bereich des Kälte-Effekts auf die Morbidität. Eine generelle Temperaturabnahme kann den Blutdruck erhöhen (Wang et al. 2017), was eine Gefahr für Personen mit Herz-Kreislaufproblemen darstellt (Sun et al. 2018). Die Ergebnisse von Song et al. (2018) zeigen einen Anstieg der Morbidität pro 1 °C Abnahme der Lufttemperatur um 0,9 % in jüngeren Menschen und Personen mittleren Alters, bei Älteren steigt das Risiko um 1,3 %. Phung et al. (2016) nennen eine Zunahme von 2,8 % der Krankenhausaufnahmen aufgrund von KVK nach einer Kälte-Exposition. Auch das Risiko eines akuten Myokardinfarktes steigt, pro 10 °C Temperaturabnahme um 9 %. Dieser Zusammenhang gilt in Deutschland und Belgien vor allem im Sommer und weniger stark im Winter, was auf die Belastung einer plötzlichen Temperaturänderung und weniger auf länger anhaltende kühle Temperaturwerte hindeutet (Wolf et al. 2009; Claeys et al. 2015; Claeys et al. 2017). Eine Exposition während einer Kälte-welle zeigt ein zusätzliches Risiko (Ryti et al. 2015). Ein Review von Studien aus Großbritannien zeigt ebenfalls ein erhöhtes Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko aufgrund einer Kälte-Exposition auf (Hajat 2017). Zudem konnte bisher kein Hinweis gefunden werden, dass die aufgrund des Klimawandels zunehmende Zahl milderer Winter das Gesundheitsrisiko senken. Andere Gründe wie ein besserer Schutz ärmerer Menschen vor Kälte haben aber bereits für einen Rückgang des Risikos gesorgt (Hajat 2017).

Innertägliche Temperaturschwankungen sind negativ mit der KVK-Morbidität korreliert: pro 1 °C Zunahme der Spannweite der täglichen Lufttemperatur, nimmt die Belastung auf Personen mit kardiovaskulären Erkrankungen zu (Phung et al. 2016), die Mortalität ist ebenso betroffen (Cheng et al. 2014).

Studien und Review-Artikel bestätigen und verbessern die Kenntnisse über die Wirkung von Luftbeimengungen auf kardiovaskuläre Erkrankungen (Claeys et al. 2017). Vor allem die Exposition gegenüber Feinstaub zeigt sich belastend, so nennen Achilleos et al. (2017) eine Zunahme der KVK-Mortalität um 0,8 % pro 10 µg/m³ PM_{2,5}-Erhöhung. Auch die arterielle und venöse Thrombose ist von der Feinstaubbelastung betroffen, wobei sich eine kurzfristige Exposition nur auf die arterielle Thrombose auswirkt, die tiefe Venenthrombose zeigt keine Zunahme (Signorelli et al. 2017).

Eine Literaturstudie von Grant et al. (2017) hat neue Erkenntnisse zur Wirkung der Sonnen-Exposition auf kardiovaskuläre Erkrankungen gesammelt. Es konnte ein positiver Einfluss einer Sonnen-Exposition bzw. Exposition gegenüber UV-Strahlung auf die KVK-Mortalität gefunden werden (Lindqvist et al. 2016). Eine Sonnen-Exposition reduziert den Blutdruck, was das Risiko für diverse Herzerkrankungen senkt (Liu et al. 2014). Durch Vitamin-D-Präparate konnte in medizinischen Studien ein geringeres Risiko für Herzversagen, aber nicht für Herzinfarkt oder Schlaganfall gefunden werden (Ford et al. 2014).

Die umfangreichen Review-Artikel der letzten Jahre nennen keinen signifikanten Effekt anderer meteorologischer Parameter wie Luftdruck, Feuchte oder Wind, was die Erkenntnisse der Vorläuferstudie dieses Projektes bestätigt.

3 Datengrundlage

3.1 Morbiditäts- und Mortalitätsdaten

Daten zur Mortalität und Morbidität in Deutschland für den Zeitraum von 2001 bis einschließlich 2015 wurden vom Forschungsdatenzentrum des Bundes in Kamenz bezogen. Die räumliche und zeitliche Auflösung der jeweiligen Mortalitäts- und Morbiditätsdaten sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Mortalitätsdaten liegen als Anzahl der Sterbefälle aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (CLRD, cronic lower respiratory diseases) (Ursache nach ICD-10-Codes J40 – J47) und aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (IHK) (Ursache nach ICD-10-Codes I20 – I25) vor. Die geringe Anzahl der Sterbefälle mit den Ursachen J40 – J47 erlaubte nur eine zeitliche Auflösung von zwei Tagen (Tabelle 9). Die hohe Anzahl an Sterbefällen aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen erlaubte eine tägliche Auflösung und, zusätzlich zur Gesamtursachengruppe (I20 – I25), eine differenziertere Betrachtung für die weibliche und männliche Bevölkerung sowie der Subtypen I20 – I22 und I24 – I25. Weitere Mortalitätsdaten liegen für Sterbefälle aufgrund von vorsätzlicher Selbstbeschädigung (ICD-10-Codes X60 – X84) vor. Im Weiteren werden diese Sterbefälle als Suizide aufgeführt.

Morbiditätsdaten (alle in täglicher Auflösung) liegen in Form von Hauptdiagnosen vor, die bei Krankenhauseinlieferungen gestellt werden (Diagnosefälle). Hier ermöglichen die hohen Fallzahlen eine Differenzierung der Atemwegserkrankungen nach Geschlecht und in die Gruppen der Ursachen J20 – J22, J30, J44, J45 – J46, J40 – J43 + J47³ sowie eine weitere Differenzierung bei den ischämischen Herzerkrankungen (Ursachengruppen I20, I21 – I23). Als weiteres Krankheitsbild wurden Diagnosefälle von psychischen- und Verhaltensstörungen bestellt. Diese liegen in den Ursachengruppen nach ICD-10-Codes F10, F32 – F33, F43 und F45 vor (Tabelle 9).

Die räumliche Auflösung beschreibt Regionen innerhalb Deutschlands basierend auf den NUTS2 – Regionen („Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik“, 38 Regionen, z. B. Regierungsbezirke (Destatis 2019)). Aufgrund des Datenschutzes werden Tage, an denen in der jeweiligen Region zwischen einem und fünf Sterbe- oder Diagnosefälle auftraten, als Geheimhaltungsfälle erklärt und pauschal als Tag mit drei Fällen ausgegeben. Vor allem Regionen mit einer geringen Bevölkerungsanzahl enthalten viele dieser Geheimhaltungsfälle, was dazu führte, dass alle Datensätze auf 20 Regionen aggregiert werden mussten. Datensätze mit sehr geringer Fallzahl wie z. B. Asthma bronchiale konnten in maximal sieben Regionen unterteilt werden. Die Berechnungen erfolgen für die jeweiligen Datensätze auf Basis dieser 20 bzw. sieben Regionen (z. B. für den Deutschlandmittelwert). Zur besseren Vergleichbarkeit werden grafische Ergebnisse jedoch für die sieben Großregionen (Nord, Nord-West, West, Mitte, Süd-West, Süd-Ost, Ost) in Deutschland gezeigt (Abbildung 11).

³ Die Einzeldiagnosen J40 bis J43 und J47 wurden für die Auswertung zu einer „Cluster-Diagnose“ zusammengefasst.

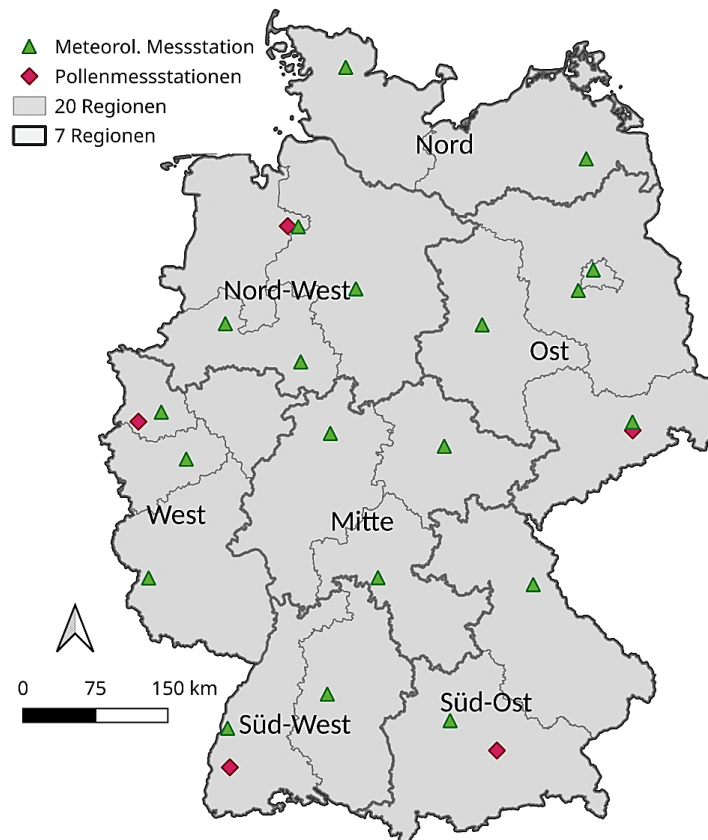
Tabelle 9: Übersicht über die vorhandenen Gesundheitsdaten mit ICD-10-Code, Bezeichnung, Fallsumme und Anzahl der Geheimhaltungsfälle (GF), der originalen räumlichen und zeitlichen Auflösung.

| ICD-10-Code | Bezeichnung | Summe Diagnosen/ Anzahl GF | Anz. Regionen | Zeitl. Aufl. (Tage) | Summe Sterbefälle/ Anzahl GF | Anz. Regionen | Zeitl. Aufl. (Tage) |
|-----------------|--|----------------------------|---------------|---------------------|------------------------------|---------------|---------------------|
| | Atemwegserkrankungen | | | | | | |
| J40 – J47 | Chronische Erkrankungen der unteren Atemwege | 3 416 824/ 2 271 | 25 | 1 | 419 589/ 696 | 7 | 2 |
| | Frauen | 1 550 774/ 38 313 | 20 | 1 | | | |
| | Männer | 1 852 345/ 18 972 | 20 | 1 | | | |
| J20 – J22 | Sonstige akute Infektionen der unteren Atemwege | 1 430 193/ 59 862 | 25 | 1 | | | |
| J44 | COPD | 2 604 547/ 8 499 | 25 | 1 | | | |
| J45 – J46 | Asthma bronchiale | 438 409/ 27 675 | 7 | 1 | | | |
| J40 – J43 + J47 | Chron. Bronchitis, Emphysem, Bronchiektasen | 359 340/ 38 847 | 7 | 1 | | | |
| | Ischämische Herzkrankheiten | | | | | | |
| I20 – I25 | Ischämische Herzkrankheiten | 10 725 208/54 | 38 | 1 | 2 102 169/ 3 768 | 31 | 1 |
| | Frauen | 3 538 631/ 2 403 | 38 | 1 | 1 046 932/ 61 947 | 20 | 1 |
| | Männer | 7 042 772/ 264 | 38 | 1 | 1 031 653/ 60 429 | 20 | 1 |
| I20 | Angina Pectoris | 3 920 783/ 3 360 | 20 | 1 | | | |
| I20 – I22 | Angina Pectoris , akuter und rezidivierender Myokardinfarkt | | | | 900 650/ 85 827 | 20 | 1 |
| I21 – I23 | Akuter und Rezidivierender Myokardinfarkt inkl. Komplikationen | 3 083 000/ 1 773 | 20 | 1 | | | |

| ICD-10-Code | Bezeichnung | Summe Diagnosen/ Anzahl GF | Anz. Regionen | Zeitl. Aufl. (Tage) | Summe Sterbefälle/ Anzahl GF | Anz. Regionen | Zeitl. Aufl. (Tage) |
|-------------|---|----------------------------|---------------|---------------------|------------------------------|---------------|---------------------|
| I24 – I25 | Sonstige akute und chronische ischämische Herzkrankheiten | 3 719 120/ 48 525 | 20 | 1 | 1 180 222/ 44 817 | 20 | 1 |
| | Psychische Störungen | | | | | | |
| X60 – X84 | Vorsätzliche Selbstbeschädigung (Suizid) | - | - | - | 149 286/ 14 433 | 7 | 2 |
| F10 | Psych. & Verhaltensstörungen durch Alkohol | 4 729 181/ 66 | 25 | 1 | | | |
| F32 – F33 | Depressive Störungen | 3 035 556/ 27 810 | 25 | 1 | | | |
| F43 | Reaktion auf Belastungs- und Anpassungsstörung | 1 030 046/ 2 226 | 7 | 1 | | | |
| F45 | Somatoforme Störungen | 548 538/ 23 472 | 7 | 1 | | | |

Erläuterungen: GF, Geheimhaltungsfälle (Tage zwischen eins und fünf Fällen).

Abbildung 11: Karte der regionalen Auflösung der Morbiditäts- und Mortalitätsdaten in Deutschland und dazugehöriger Wetterstationen.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle 10: Regionale Auflösung der Gesundheitsdaten in der NUTS-Auflösung, Aggregation auf sieben Großregionen in Deutschland mit Regionalcodes und den dazugehörigen Wetterstationen. Die Daten der Wetterstationen werden für die sieben Großregionen gemittelt.

| Regional-code | NUTS2-Region (38 Regionen) | Aggregation auf 20 Regionen | Aggregation auf 7 Regionen | Zugehörige Wetterstation | Zeitraum der Datenverfügbarkeit |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| R010 | Schleswig-Holstein | R019 | Nord | Schleswig | 2001 – 2015 |
| R020 | Hamburg | | Nord | | |
| R130 | Mecklenburg-Vorpommern | R130 | Nord | Trollenhagen | 2002 – 2015 |
| R031 | Braunschweig | R039 | Nord-West | Hannover Flughafen | 2001 – 2015 |
| R033 | Lüneburg | | Nord-West | | |
| R032 | Hannover | | Nord-West | | |
| R034 | Weser-Ems | R049 | Nord-West | Bremen Flughafen | 2001 – 2015 |
| R040 | Bremen | | Nord-West | | |
| R055 | Münster | R058 | Nord-West | Münster/Osnabrück Flughafen | 2001 – 2015 |
| R057 | Detmold | | Nord-West | | |
| R051 | Düsseldorf | R051 | West | Düsseldorf Flughafen | 2001 – 2015 |
| R053 | Köln | R053 | West | Köln/Bonn Flughafen | 2001 – 2015 |
| R059 | Arnsberg | R059 | West | Bad Lippspringe | 2001 – 2015 |
| R071 | Koblenz | R109 | West | Trier | 2001 – 2015 |
| R073 | Rheinhessen-Pfalz | | West | | |
| R072 | Trier | | West | | |
| R100 | Saarland | | West | | |
| R064 | Darmstadt | R060 | Mitte | Fritzlar | 2002 – 2015 kein SD |
| R065 | Gießen | | Mitte | | |
| R066 | Kassel | | Mitte | | |
| R095 | Mittelfranken | R099 | Mitte | Würzburg | 2001 – 2015 |
| R096 | Unterfranken | | Mitte | | |
| R160 | Thüringen | R160 | Mitte | Erfurt/Weimar Flughafen | 2001 – 2015 |
| R081 | Stuttgart | R088 | Süd-West | Stuttgart Flughafen | 2001 – 2015 |
| R084 | Tübingen | | Süd-West | Lahr | |
| R083 | Freiburg | R089 | Süd-West | Lahr | 2001 – 2015 |

| Regional-code | NUTS2-Region (38 Regionen) | Aggregation auf 20 Regionen | Aggregation auf 7 Regionen | Zugehörige Wetterstation | Zeitraum der Datenverfügbarkeit |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| R082 | Karlsruhe | | Süd-West | Stuttgart Flughafen | |
| R092 | Niederbayern | R098 | Süd-Ost | Weiden | 2001 – 2015 |
| R093 | Oberpfalz | | Süd-Ost | | |
| R094 | Oberfranken | | Süd-Ost | | |
| R091 | Oberbayern | R090 | Süd-Ost | Augsburg | 2001 – 2015 |
| R097 | Schwaben | | Süd-Ost | | |
| R110 | Berlin | R110 | Ost | Tegel Flughafen | 2001 – 2015 |
| R120 | Brandenburg | R120 | Ost | Potsdam | 2001 – 2015 |
| R141 | Chemnitz | R140 | Ost | Dresden Flughafen | 2001 – 2015 |
| R142 | Dresden | | Ost | | |
| R143 | Leipzig | | Ost | | |
| R150 | Sachsen-Anhalt | R150 | Ost | Magdeburg | 2001 – 2015 |

Erläuterungen: NUTS, Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik.

3.2 Meteorologische Daten

Für die Untersuchungen eines Zusammenhanges zwischen dem Wetter und dem Auftreten von Atemwegs-, Herzkreislauf- und psychischen Erkrankungen stehen meteorologische Daten des Hauptmessnetzes des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung. Für jede Region wurde eine meteorologische Messstation gewählt, die möglichst repräsentativ für das Gebiet Daten für den Zeitraum 2001 bis 2015 bietet (Abbildung 11). Die Meteorologischen Daten liegen in stündlicher Auflösung vor und wurden für die Untersuchungen zu Tagesmittel, -maxima, -minima oder Tagessummen aggregiert. Verwendete meteorologische Parameter sind Lufttemperatur in 2 m Höhe (T_a), Relative Luftfeuchte (RH) und Sonnenscheindauer (SD) (bei Suiziden berücksichtigt). Um den Effekt der thermischen Umwelt auf das Auftreten von Mortalität und Morbidität zu untersuchen, werden zusätzlich zu den Lufttemperatur-Parametern auch thermische Indizes verwendet. Der Humidex (H) stellt als kombinierter Einflussfaktor aus Lufttemperatur und Luftfeuchte das thermische Empfinden des Menschen dar (Masterton und Richardson 1979).

Nicht an allen meteorologischen Stationen stehen alle gewünschten Parameter für den Zeitraum 2001 – 2015 zur Verfügung (Tabelle 10). Die für die Analyse des Zusammenhangs zwischen Mortalität bzw. Morbidität und der thermischen Umwelt benötigte Lufttemperatur und Luftfeuchte sind an allen 20 Stationen vorhanden (an Station Trollenhagen und Fritzlar erst ab 2002). Vereinzelt Fehlwerte in den Zeitreihen wurden vor dem Aggregieren zu Tageswerten durch lineare Interpolation aufgefüllt.

3.3 Pollendaten

Erhebungen zur Pollenbelastung in Deutschland werden von der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) durchgeführt. Für diese Studie wurden tägliche Pollenerhebungen der Birkenpollen (*Betula*) und Gräserpollen (zusammengefasste Arten Mutterkorn (*Secale*), Weizengras (*Triticum*), Mais (*Zea*), Gerste (*Hordeum*) und Gräserpollen (*Poaceae*)) von fünf Stationen für den

Zeitraum 2001 – 2015 vom PID erworben (Abbildung 11). Aufgrund der begrenzten finanziellen Mittel des Projektes war der Erwerb von Pollendaten nur für fünf Stationen möglich. Diese fünf Stationen wurden anhand der Datenqualität und Verfügbarkeit in dem gewählten Zeitraum, aber auch in Hinblick auf eine ausreichende Datengrundlage der Morbiditätsdaten ausgewählt. Die Verfügbarkeit der Pollendaten für diese fünf der sieben Regionen beschränkt die Analysen der Pollenbelastung auf die Regionen Nord-West (Station Delmenhorst), West (Station Mönchengladbach), Süd-West (Station Freiburg), Süd-Ost (Station München) und Ost (Station Dresden).

3.4 Klimaszenarien

3.4.1 Regionale Klimamodelle

Für Aussagen zur Entwicklung des Klimas bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wurden Daten von Klimaprojektionen verwendet, die für die Referenz-Ensembles des DWD zusammengestellt wurden (DWD-Referenzensembles v2018) (Brienen et al. 2020; Razafimaharo et al. 2020). Diese Klimaprojektionen wurden im Rahmen des EURO-CORDEX (regionale europäische Klimaprojektionen des Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) und des ReKliES-De-Projektes (Regionale Klimaprojektions-Ensemble für Deutschland) erstellt. Dafür wurden Simulationen von sechs verschiedenen globalen Klimamodellen (GCM) mit verschiedenen Realisierungen in Kombination mit fünf regionalen Klimamodellen (RCM) verwendet (Tabelle 11). Für die beiden RCP-Szenarien RCP4.5 (moderates Klimaschutzszenario) und RCP8.5 (Weiter-wie-bisher-Szenario) liegt je ein Ensemble an Klimamodellläufen vor (multi-model-ensemble). Das Ensemble des RCP4.5-Szenarios besteht aus 12 verschiedenen Klimamodellläufen (12 Member), das Ensemble des RCP8.5-Szenarios hat 21 Member. Die Simulationen decken Deutschland und angrenzende Gebiete ab (Abbildung 12) und haben eine ursprüngliche räumliche Auflösung von 0,11° (~ 12 km). Zusätzlich wurde eine multivariate Bias-Adjustierung anhand der Temperaturgrößen durchgeführt (Brienen et al. 2020; Razafimaharo et al. 2020). Für alle Modellläufe stehen auch die entsprechenden historischen Läufe zur Verfügung. Damit bestehen für alle Ensemble-Member ein durchgehender Verlauf an täglichen Daten für den Zeitraum 1971 – 2097 zur Verfügung (einige Modellläufe reichen nicht bis 2100).

Tabelle 11: Auflistung der verwendeten Ensembledaten der beiden RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 mit den jeweiligen Modellläufen und dafür verwendeten globalen (GCM) und regionalen (RCM) Klimamodellen und Realisierungen (r1, r2, r12) (nach Brienen et al. (2020)).

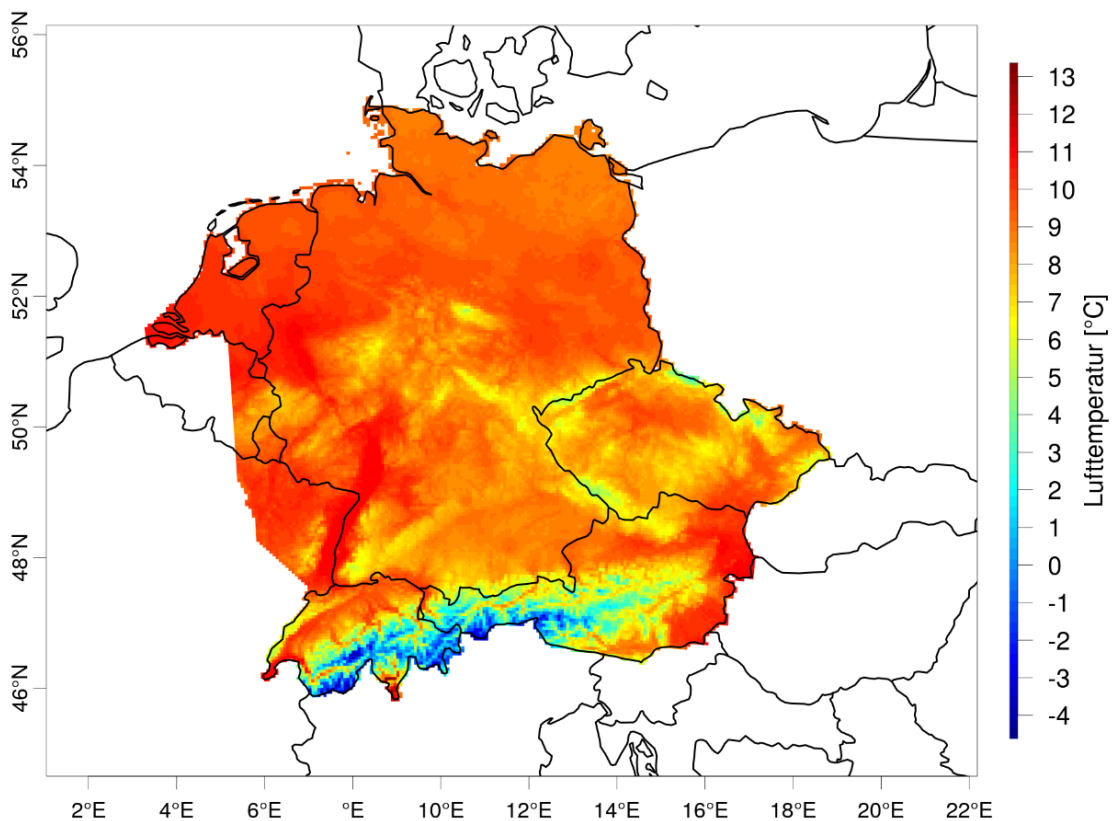
| GCM | RCP4.5 | RCP4.5 | RCP4.5 | RCP4.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP8.5 | RCP8.5 | RCP8.5 | RCP8.5 |
|--------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| RCM | CCLM | RACMO | RCA4 | REMO | WRF | CCLM | RACMO | RCA4 | REMO | WRF |
| Can-ESM2 | | | | | | r1 | | r1 | | |
| EC-EARTH | r12 | r1, r12 | r12 | | | r1 | r1, r12 | r12 | r12 | r1 |
| HadGEM2-ES | r1 | r1 | r1 | | | r1 | r1 | r1 | r1 | r1 |
| IPSL-CM5A-MR | | | r1 | | | | | r1 | | |
| MIROC5 | | | | | | r1 | | | r1 | |
| MPI-ESM-LR | r1 | | r1 | r1, r2 | | r1 | | r1 | r1, r2 | r1 |

Erläuterungen: GCM, Globale Klimamodelle; RCM, Regionale Klimamodelle.

Für die Untersuchungen des Klimatrends werden aus dem Gesamtzeitraum der Klimasimulationen drei Zeiträume von jeweils 30 Jahren ausgewählt, welche einen Referenzzeitraum (1981 – 2010), eine nahe Zukunft (2021 – 2050) und eine ferne Zukunft (2068 - 2097) repräsentieren. Für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 werden alle historischen Läufe der beiden Ensembles (RCP4.5 und RCP8.5) zusammengenommen, damit besteht das Ensemble des Referenzzeitraumes aus 33 Mitgliedern.

Analysen über den Klimatrend erfolgen sowohl für die gitterbasierten Daten als auch für die sieben Großregionen in Deutschland. Dafür werden die gitterpunkt-basierten Klimaabschätzungen auf die sieben Regionen aggregiert. Auf Basis der Regionen gehen die statistischen Zusammenhänge zwischen thermischer Umwelt und der Mortalität in die Berechnungen des Klimatrends ein.

Abbildung 12: Mittlere Lufttemperatur [°C] der Jahre 1981 – 2010 eines Modells des RCP8.5-Ensembles (GCM = EC-EARTH, RCM = RACMO, Realisierung = r1) als Beispiel für die räumliche Abdeckung der Klimaprojektionsdaten in Europa.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

3.4.2 Referenzdatensatz HYRAS

Für einen Vergleich der Ensemble-Daten mit Beobachtungsdaten im Referenzzeitraum 1981 -2010 wurde der HYRAS-Datensatz hinzugezogen (Frick et al. 2014; Brienens et al. 2020). Die interpolierten Messwerte bilden einen Rasterdatensatz, der tägliche Werte der Lufttemperatur (Tagesmittel-, minimum- und maximum), Relative Feuchte, Niederschlag und Globalstrahlung enthält. HYRAS hat eine räumliche Auflösung von 5x5 km und deckt Deutschland und deutsche Flusseinzugsgebiete in angrenzenden Regionen ab (Brienens et al. 2020).

4 Methoden

4.1 Bestimmung des Erwartungswertes

Um einen möglichen thermischen Einfluss zu ermitteln, wurde das Verfahren nach Koppe (2005) und Koppe et al. (2013a) angewandt. Damit ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu denen der Vorläuferstudie gegeben, die den Einfluss des Wetters auf ischämische Herzkrankheiten im Zeitraum 2001 bis 2010 in Deutschland untersucht hat (Koppe et al. 2013a). Alle Datenanalysen erfolgten mit der Programmiersprache R (R-Core-Team 2019).

Daten zur Mortalität und Morbidität unterliegen naturgemäß jahreszeitlichen Schwankungen, welche meist durch höhere Fallzahlen im Winter hervorgerufen werden (Abbildung 13, Abbildung 14). Die verwendeten Morbiditätsdaten werden zusätzlich von einem ausgeprägten Wochengang überlagert, der eine weitere Bereinigung notwendig macht. Vor der Berechnung des Jahresganges werden die Daten auf die Bevölkerungszahl der Region normiert und starke Ausreißer eliminiert.

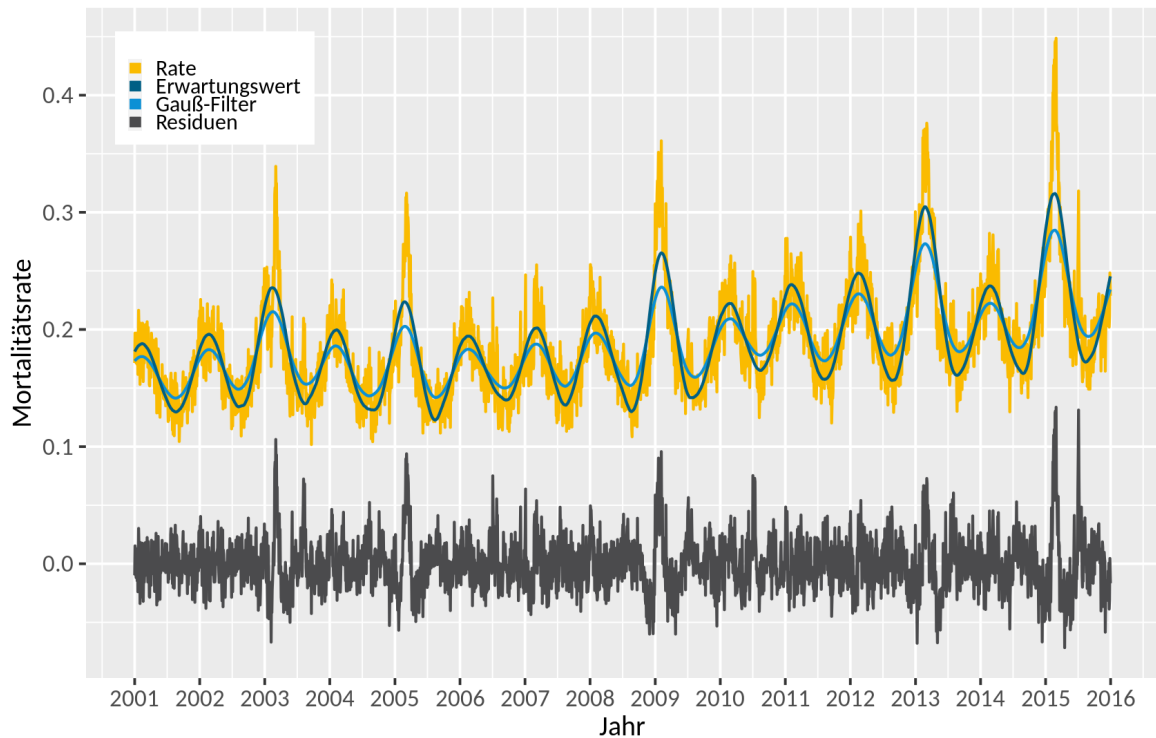
Mit Hilfe einer Normierung der Daten auf die Bevölkerungszahl wurden Trends, die durch Schwankungen in der Bevölkerungszahl der einzelnen Regionen bedingt werden, eliminiert. Dafür wurden die fortschreibenden Bevölkerungszahlen der GENESIS-Datenbank des statistischen Bundesamtes verwendet. Die Bevölkerungszahlen der jährlichen Stichtage zum 31.12. wurden linear interpoliert, um den gesamten Zeitraum abzudecken. Die daraus entstehende Mortalitäts- bzw. Morbiditätsrate bezieht sich auf die Anzahl der Fälle pro Tag (bzw. pro 2-Tage bei den Datensätzen mit Zweitagesummen der Fallzahlen, Mortalität J40 – J47 und X60 – X84) und pro 100 000 Personen.

Um den Jahresgang der Mortalitäts- bzw. Morbiditätsraten darzustellen, wird der Erwartungswert (EW) berechnet. Dieser wird mittels eines mehrstufigen Filterverfahrens bestimmt und zeigt einen geglätteten Jahresverlauf. Bei den Diagnosefällen wird während des Verfahrens der Wochengang mitberücksichtigt (Koppe 2005). Der erste Schritt ist ein Gaußscher Tiefpassfilter mit einer Länge von 365 Tagen (bzw. 182 Tage für Datensätze mit Zweitagesummen der Fallzahlen, Mortalität J40 – J47 und X60 – X84), der über die Daten gelegt wird. Die Filtergewichte basieren auf der standardisierten Normalverteilung und gewichten einen Mittelwert, der mit den vorherigen und nachfolgenden Werten berechnet wird. Die Gewichtung ist stärker, je näher die nebenstehenden Werte an dem zu berechnenden Wert liegen. Damit der EW nicht von kurzfristigen Variationen in den Daten beeinflusst wird (Influenza, Hitzeperioden), werden die Daten zuvor um Ausreißer (Werte ≤ 3 -fache Standardabweichung) bereinigt und durch linear interpolierte Werte ersetzt. Die resultierenden tiefpassgefilterten Daten zeigen jedoch noch zu wenig Variation und stellen den Jahresgang der Daten nicht ausreichend dar (Abbildung 13).

Als zweiter Schritt wird daher ein sogenanntes Restaurationsverfahren angewendet, welches die vorherige Tiefpassfilterung korrigiert. Dabei wird der bereits gefilterte Jahresgang um einen Faktor k gestreckt, um im Ursprungsdatensatz vorhandene Maxima und Minima besser nachzubilden. Der Faktor wird mit der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung bestimmt und mit den Werten des gauß-gefilterten Jahresganges multipliziert. Diese restaurierten Werte entsprechen nun dem Erwartungswert der Zeitreihe, wobei sowohl lineare als auch nicht-lineare Trends direkt berücksichtigt werden (Koppe 2005).

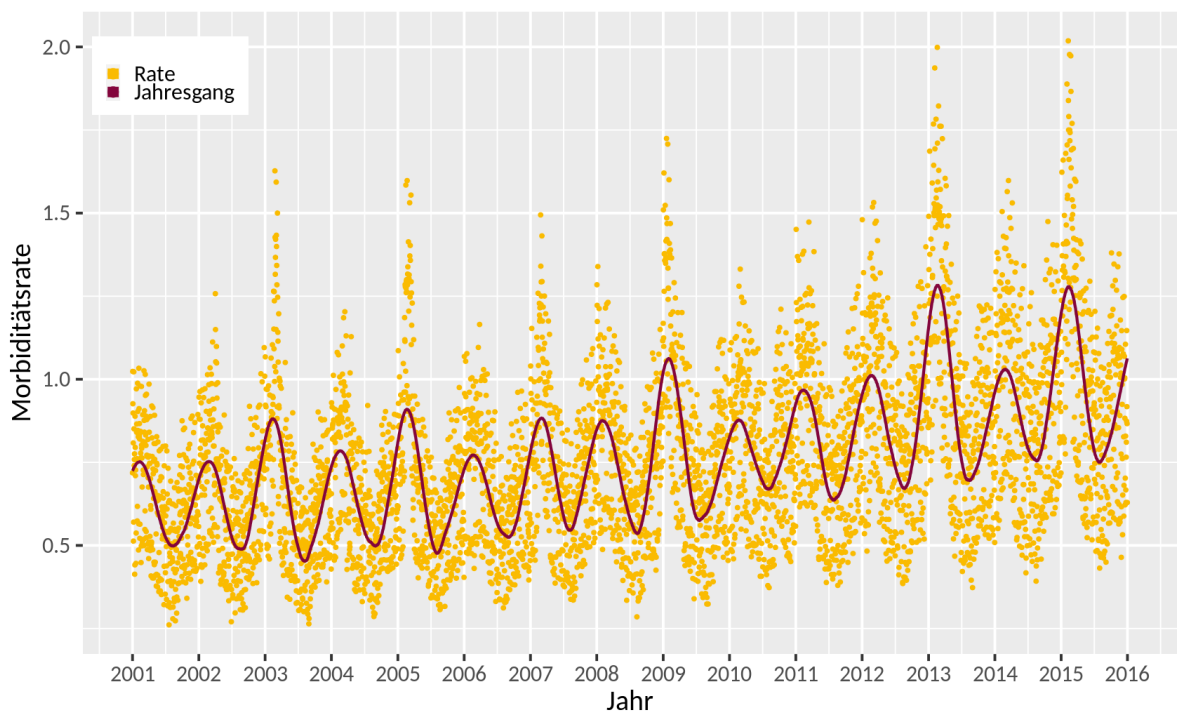
Der Erwartungswert für Mortalitätsraten ist mit diesem Schritt abgeschlossen und entspricht dem Jahresgang. Die Morbiditätsdaten benötigen jedoch zusätzlich noch eine Wochengangbereinigung. Mit der Wochengangbereinigung ist der Erwartungswert nicht mehr gleichzusetzen mit dem Jahresgang (Abbildung 14 und Abbildung 15).

Abbildung 13: Darstellung der Schritte zur Bestimmung des Erwartungswertes (EW) der Mortalitätsrate (Fälle pro 2-Tage und 100 000 Personen) chronischer Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) der Jahre 2001 – 2015 mit der Abweichung vom Erwartungswert (Residuen) und der Gaußschen Tiefpassfilterung.



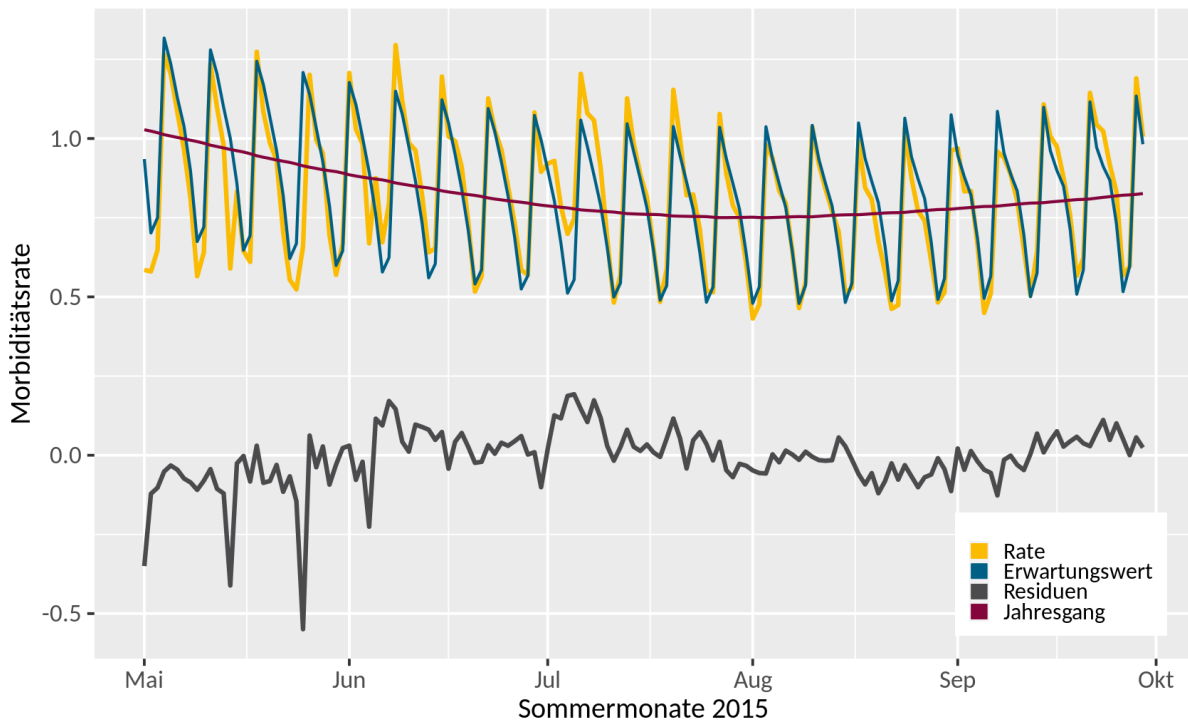
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 14: Morbiditätsrate und Jahresgang von Krankenhauseinlieferungen mit COPD (J44) für den Zeitraum 2001 bis 2015.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 15: Morbiditätsrate, Jahresgang, Erwartungswert und Abweichungen vom Erwartungswert (Residuen) von COPD (J44) für den Zeitraum vom 01. Mai bis 30. September 2015.



Quelle: eigene Abbildung, DWD.

Der Wochengang der Krankenhauseinlieferungen zeigt ein Maximum am Anfang der Woche, das Minimum liegt am Wochenende (Abbildung 15). Die Bereinigung erfolgt durch eine separate Berechnung des Erwartungswertes pro Wochentag. Dafür wird eine Teilzeitreihe erstellt, die nur Morbiditätsraten eines Wochentages enthält. Über diese Teilzeitreihe wird wiederum der Gaußsche Tiefpassfilter gelegt und mit dem Faktor k korrigiert. Der Gaußfilter hat dafür eine Länge von $365/7 = 52$ Tagen. Nach der Bereinigung wird die Zeitreihe mit den berechneten Erwartungswerten in die ursprüngliche Reihenfolge gebracht (Abbildung 15). Erste Analysen zeigen bei den Morbiditätsdaten einen starken Einfluss von Feiertagen, der alle anderen Trends überlagert. Daraufhin wurden die Daten dieser Tage in den Morbiditätsdaten entfernt und als Fehlwert markiert.

4.2 Relatives Risiko

Der ausgeprägte Jahresgang von Mortalität und Morbidität mit einem Maximum im Winter kann viele Ursachen haben. Welcher Anteil davon auf den Einfluss des Wetters zurückzuführen ist und welcher auf witterungsunabhängige Faktoren wie z. B. Bewegung, Vitamin-D-Mangel und akute Infektionen der oberen Atemwege wie eine Grippe, ist unklar. Um den Einfluss des Wetters möglichst unabhängig von anderen Faktoren zu betrachten, wird die Abweichung der Mortalitäts- oder Morbiditätsrate vom Erwartungswert (Residuen) im Verhältnis zum Erwartungswert betrachtet (Formel 1). Daraus ergibt sich ein Relatives Risiko (RR) unabhängig vom Jahresgang. Werte mit $RR > 1$ bedeutet damit ein erhöhtes Risiko für Sterbefälle oder Krankenhausaufnahmen, $RR < 1$ bedeutet, dass das Risiko an diesem Tag geringer war als erwartet.

$$RR = 1 + \text{Residuen} / \text{Erwartungswert} \quad (\text{Formel 1})$$

4.3 Zusammenhang zwischen thermischer Umwelt und Mortalität bzw. Morbidität

Der Zusammenhang zwischen thermischer Umwelt und dem Auftreten von Symptomen und Todesfällen wird mit der Mortalitätsrate und mit dem jahresgangunabhängigen Relativen Risiko (RR) abgeschätzt und in Form einer „Expositions-Wirkungs-Kurve“ dargestellt.

Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur (T_a) werden in 3 °C breite Intervalle eingeteilt; für diese Intervalle werden die Mittelwerte der Mortalitätsrate und des Relativen Risikos, die Standardabweichung und das 95 % Konfidenzintervall berechnet. Um einen kontinuierlichen Verlauf der Beziehung zwischen Rate bzw. RR und T_a zu gewährleisten, werden die Intervalle mit einer Schrittgröße von 0,1 °C verschoben. Für die Darstellung der thermischen Abhängigkeit werden nur Temperatur-Intervalle berücksichtigt, die mindestens 30 Werte enthalten.

Bei der Verwendung der Mortalitätsraten, die nicht durch den Gauß-Filter und die Restauration trendbereinigt sind, wird eine einfache langfristige Trendbereinigung durchgeführt. Dieser wird mittels linearer Regression in den Mortalitätsdaten bestimmt. Die daraus resultierenden gefitteten Werte des linearen Modells werden von den Raten subtrahiert, anschließend der Mittelwert der Zeitreihe wieder addiert. Die Verwendung der Mortalitätsraten dient allerdings hauptsächlich dem Vergleich verschiedener ICD-Diagnosegruppen in ihrem Auftreten in der Bevölkerung und ihrem Jahresgang. Die Exposition kann in diesem Fall nicht nur auf die Lufttemperatur bezogen werden. Von den Morbiditätsdaten wird nur das Relative Risiko genutzt, da der starke Wochengang eine Verwendung absoluter Fallzahlen nicht möglich macht.

Mit dem Relativen Risiko können Schwellenwerte (SW) berechnet werden, die den thermisch optimalen Bereich angeben, in dem das RR der jeweiligen Todes- oder Krankheitsursache am geringsten ist. Die Schwellenwerte sind definiert als die Lufttemperatur (bzw. Humidex), ab dem das RR, ausgehend vom minimalen RR im mittleren Temperaturbereich, auf beiden Seiten (zum kalten und warmen Temperaturbereich hin) das erste Mal signifikant über eins steigt. Signifikante Unterschiede vom Wert Eins wurden auf Basis eines Students t-test auf einem Signifikanzniveau von 95 % ermittelt. Das bedeutet, der untere Schwellenwert gibt die Lufttemperatur (Tagesmittelwert) an, unter der das Risiko erhöht ist und damit mehr Fälle auftreten als zu dieser Jahreszeit zu erwarten sind (Kälteeffekt). Der obere Schwellenwert gibt die Lufttemperatur (Tagesmittelwert) an, oberhalb derer das Risiko ebenfalls erhöht ist (Wärmeeffekt). Das Minimum von RR wird zwischen 0 °C und 25 °C gesucht, da dort der thermisch optimale Bereich zu erwarten ist und damit Ausreißer in den Randbereichen die Suche der Schwellenwerte nicht behindern.

4.4 Temperatur-Assoziierte-Mortalität

Ausgehend von den statistischen Zusammenhängen zwischen der Lufttemperatur und der Mortalität aufgrund von IHK und CLRD, wird die zukünftige gesundheitliche Belastung abgeschätzt. Die Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) beschreibt dabei die Abweichung der Mortalitätsrate (Fälle / 100 000 Personen) vom Erwartungswert, die dem Einfluss der Lufttemperatur zugeschrieben wird. Dafür kann sowohl die gesamte Temperaturspanne, als auch ausgewählte Temperaturbereiche verwendet werden. TAM wird in Prozent angegeben (Zacharias und Koppe 2014).

Für einen bestimmten Zeitraum (z. B. Referenzzeitraum 1981 - 2010) lässt sich eine Häufigkeitsverteilung bestimmen, in die die Anzahl der Tage (ANZ) in 0,1 °C-Temperaturklassen (k) eingeht (Abbildung 16). Das RR der Mortalität pro Temperaturklasse ($RR(k)$) wird dann in Bezug zu der Häufigkeit dieser Temperaturklasse gesetzt. Über diese Häufigkeitsverteilung wird als nächster

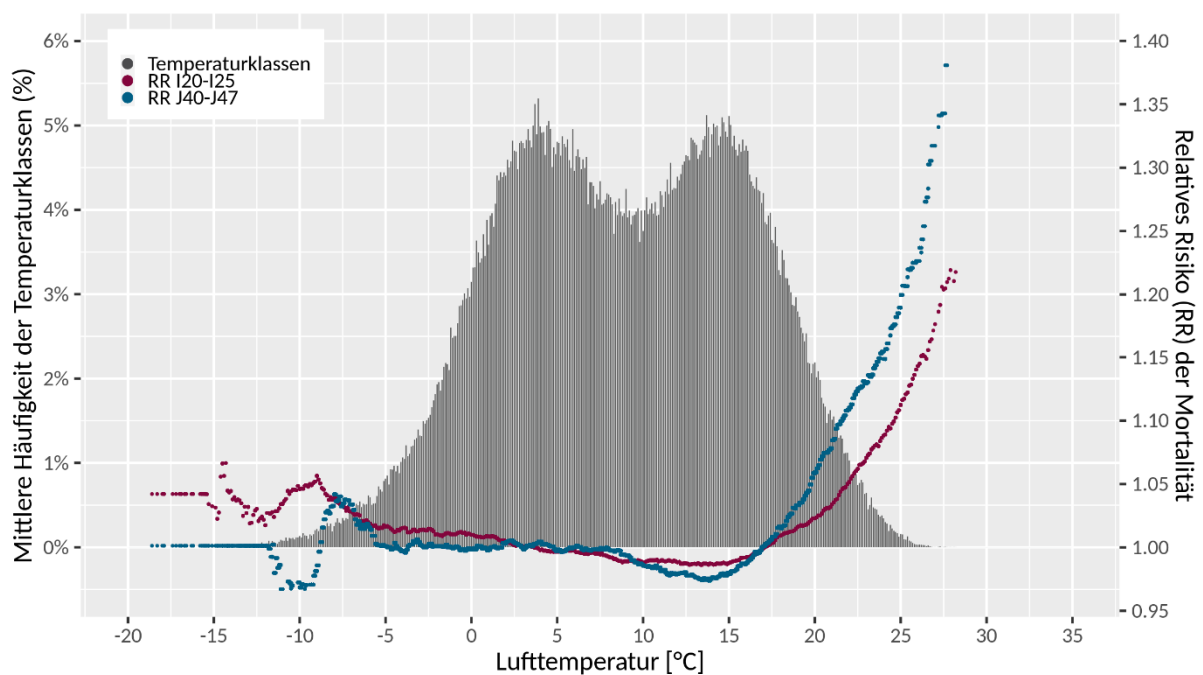
Schritt ein mittleres Relatives Risiko (RRmean) über den Zeitraum berechnet (Formel 2) mit n als Anzahl der Temperaturklassen. Die Abschätzung der Temperatur-Assoziierten Mortalität erfolgt durch Formel 3. Ein Beispielwert von TAM = 5 (RRmean = 1,05) ergibt ein um 5 % erhöhtes Mortalitätsrisiko aufgrund der untersuchten Temperaturspanne innerhalb des Untersuchungszeitraumes.

$$RR_{mean} = \frac{\sum_{k=1}^n [RR(k) * ANZ(k)]}{\sum_{k=1}^n ANZ(k)} \quad (\text{Formel 2})$$

$$TAM = 100 * RR_{mean} - 100 \quad (\text{Formel 3})$$

Für Lufttemperaturklassen im extrem kalten und warmen Bereich, die in dem retrospektiven Zeitraum nicht beobachtet wurden und denen somit kein RR zugeordnet werden kann, wurde das RR der nächsten beobachteten Lufttemperaturklasse extrapoliert. Dies ist vor allem für die neu auftretenden Lufttemperaturklassen mit extrem hohen Temperaturwerten bis Ende des 21. Jahrhunderts relevant (siehe Kapitel 5.1.1.2), ist aber auch im niedrigen Lufttemperaturbereich des Referenzensembles zu erkennen (Abbildung 16).

Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperaturklassen [%] der Ensembledaten des Referenzzeitraumes 1981 – 2010 und das Relative Risiko (RR) der Mortalität aufgrund von chronischen unteren Atemwegserkrankungen (J40 – J47) und ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) pro Lufttemperaturklasse für Deutschland.



Erläuterungen: I20 – I25, ischämische Herzerkrankungen; J40 – J47, chronische Erkrankungen der unteren Atemwege.
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Anhand der Berechnungen der Häufigkeitsverteilungen aus Modelldaten für verschiedene Klimaperioden und der Bestimmung der TAM können Veränderungen der TAM über die Zeit beobachtet werden. Die Verwendung der gesamten Temperaturspanne zur Bestimmung der TAM hat den Vorteil, dass sowohl die mit Kälte assoziierte Mortalität als auch die mit Hitze assoziierte Mortalität berücksichtigt wird und mit der reduzierten Mortalität im Bereich des Temperaturoptimums verrechnet wird. Zusätzlich zur gesamten Temperaturspanne werden nur die Temperaturbereiche zur Bestimmung einer TAM verwendet, welche den Wärmeeffekt und Kälteeffekt umfassen (markiert durch untere und obere Schwellenwerte).

4.5 Hitzeperioden

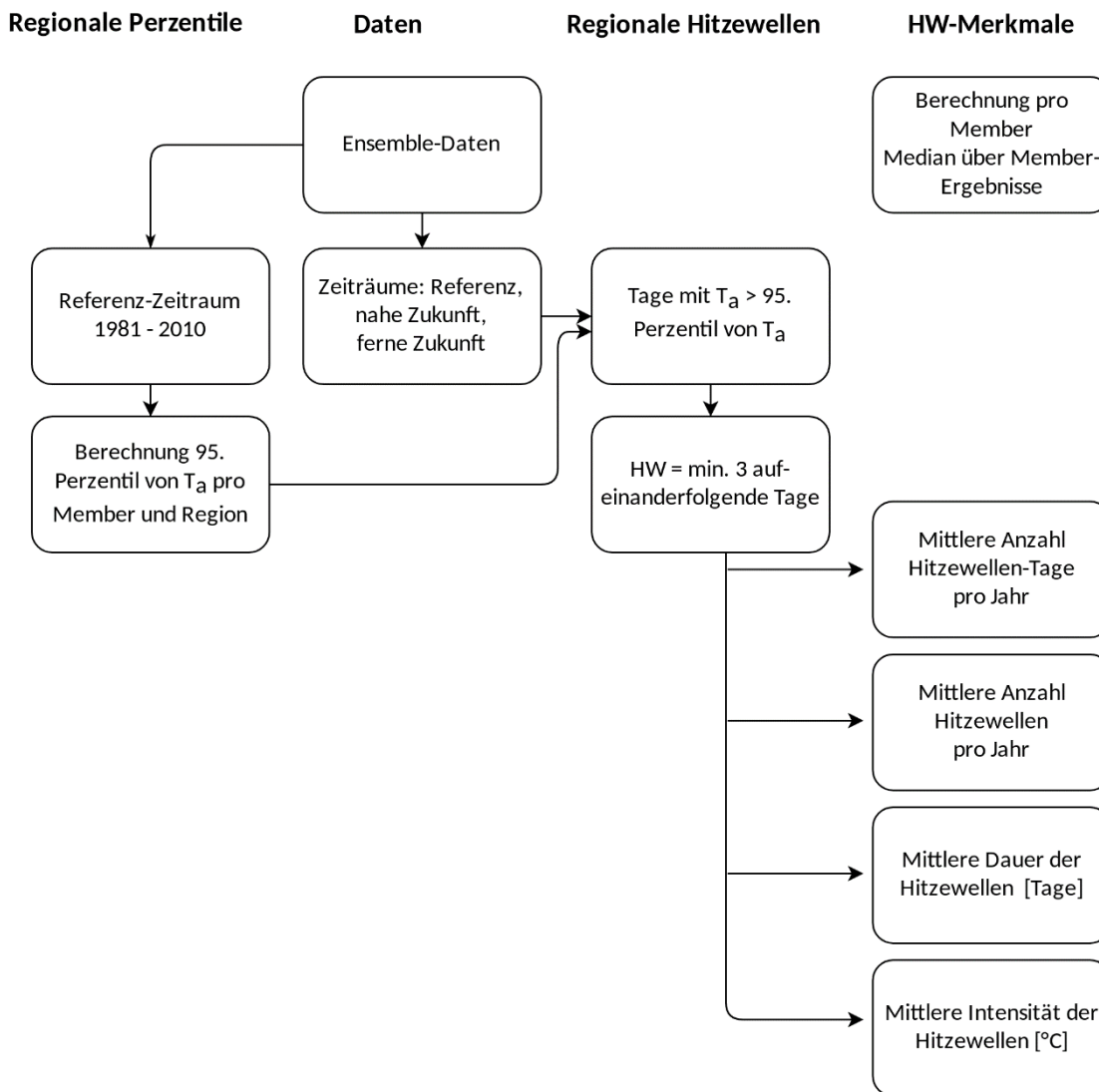
Für die Analyse werden Hitzeperioden als ‚Hitzewellen‘ definiert als eine Periode von mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Lufttemperatur (Tagesmittelwert) größer dem regionalen 95. Perzentil. Das Perzentil wurde für sieben Großregionen in Deutschland regional mit der vorliegenden Zeitreihe berechnet. Bei den Datensätzen mit Zweitagesmittelwerten (Mortalität J40 – J47 und X60 – X84) gilt eine Hitzeperiode ab mindestens zwei Werten bzw. vier Tagen hintereinander, die größer sind als das 95. Perzentil, als Hitzewelle.

Um die Auswirkungen von Hitzewellen auf die Mortalität und Morbidität in Deutschland zu untersuchen wird die prozentuale Abweichung der Mortalitätsrate bzw. Morbiditätsrate während einer Hitzewelle vom Erwartungswert dargestellt. Auswirkungen auf die Gesundheit können auch noch nach dem Ende der Hitzewelle auftreten. Um diesen verzögerten Effekt sichtbar zu machen, werden für Hitzewellen mit einer definierten Länge auch bis zu 14 Tage nach dem Ende der Hitzewelle dargestellt. Die Tage -4 (bei Zweitagesmittelwerten) bzw. -3 Tage vor und bis 14 Tage nach dem Beginn der Hitzewelle (Tag 1) werden über die einzelnen Hitzewellen gemittelt.

Die Berechnung der zukünftigen Hitzeperioden erfolgt für jedes Modell der Ensembles einzeln, anschließend wird der Median des Ensembles pro Zeitraum angegeben. Das 95. Perzentil wird aus dem Referenzzeitraum 1981 – 2010 gewonnen und für die Zeiträume in der Zukunft ebenfalls unverändert verwendet (Abbildung 17). Dies bedeutet, dass die Beziehung zwischen der Lufttemperatur und der Mortalität während Hitzewellen als gleichbleibend angenommen und keine Anpassung des Menschen an ansteigende Lufttemperaturwerte berücksichtigt wird.

Für die definierten Hitzewellen werden verschiedene Charakteristiken betrachtet. Dazu gehören die mittlere Anzahl aller Hitzewellentage pro Jahr gemittelt über den 30-jährigen Zeitraum, die mittlere Anzahl der Hitzewellen pro Jahr, die mittlere Dauer und die mittlere Intensität (Lufttemperatur) der Hitzewellen (Abbildung 17). Das Klimaänderungssignal der Szenarien über die Zukunftszeiträume 2021 – 2050 und 2068 – 2097 wird im Bezug zum Referenzzeitraum betrachtet. Das Änderungssignal des Ensembles (Ensemble-Median) ist signifikant, wenn mindestens 66 % der Modelle innerhalb des Ensembles eine signifikante Änderung angeben (Hennemuth et al. 2013). Damit wird gleichzeitig das Ergebnis als (mindestens) „wahrscheinlich“ (eng. likely) eingestuft (Mastrandrea et al. 2010). Der Signifikanztest für jedes Modell erfolgt über einen Wilcoxon-Mann-Whitney-Test.

Abbildung 17: Flussdiagramm der Berechnungsschritte der Hitzewellen (HW) und ihrer Charakteristiken für drei verschiedene Zeiträume der Ensemble-Daten. Die Berechnung erfolgt für die drei Ensembles getrennt (Referenz-, RCP4.5 und RCP8.5-Ensemble).



Erläuterungen: HW, Hitzewelle; T_a , Lufttemperatur. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

4.6 Pollenanalyse

4.6.1 Kontingenztabelle

Für die Auswertung des gesundheitlichen Effektes von hohen Pollenkonzentrationen wurde die Methodik einer Kontingenztabelle gewählt, die in der Epidemiologie häufig für Fall-Kontroll-Studien verwendet wird (Hedderich und Sachs 2016). Eine Kontingenztabelle wird im Allgemeinen mit den vier Fallzahlen aufgebaut, wobei diese nach Krankheit (bspw.: Asthmafälle (+) oder keine Fälle (-)) und Risikofaktor (bspw.: hohe Pollenbelastung (+) oder geringe Pollenbelastung (-)) eingruppiert werden (Abbildung 18). Anhand dieser vier Fallzahlen a (Anzahl der Erkrankten mit Risikofaktor), b (Anzahl der Nicht-Erkrankten mit Risikofaktor), c (Anzahl der Erkrankten ohne Risikofaktor) und d (Anzahl der Nicht-Erkrankten ohne Risikofaktor) kann die Odds Ratio (OR), auch Chancenverhältnis genannt, bestimmt werden.

Abbildung 18: Aufbau und Parameter einer Kontingenztabelle für epidemiologische Fall-Kontroll-Studien.

| | | Krankheit | |
|-------------------|---|-----------|---|
| | | + | - |
| Risiko- faktor | + | a | b |
| | - | c | d |

a = Anzahl der Erkrankten mit Risikofaktor
 b = Anzahl der Nicht-Erkrankten mit Risikofaktor
 c = Anzahl der Erkrankten ohne Risikofaktor
 d = Anzahl der Nicht-Erkrankten ohne Risikofaktor

Quelle: Eigene Abbildung, DWD.

Die OR gibt das Verhältnis zwischen der Chance der Exposition der Erkrankten (a / c) und der Chance der Exposition der Nicht-Erkrankten (b / d) an (Formel 4) (Hedderich und Sachs 2016). Alle Datenanalysen erfolgten mit der Programmiersprache R (R-Core-Team 2019). Die OR wird mit der Funktion „oddsratio“ aus dem Paket „fsm“ (Nakazawa 2019) berechnet, welche neben der OR und dem dazugehörigen P-Wert auch das 95%-Konfidenzintervall ausgibt.

$$OR = \frac{a}{c} \div \frac{b}{d} = \frac{a * d}{b * c} \quad (\text{Formel 4})$$

Die Exposition gegenüber dem Risikofaktor kann je nach Wert der OR als Risiko (schädlich) oder sogar als Nutzen (schützend) eingeordnet werden (Tabelle 12). Ob dieses Risiko oder der Nutzen auch statistisch signifikant ist, lässt sich anhand des Konfidenzintervalls zur OR und mittels des Chi-Quadrat-Tests (χ^2 -Test) überprüfen. Liegt die errechnete Prüfgröße χ^2 über dem entsprechenden Wert der Chi-Quadrat-Verteilung mit dem Signifikanzniveau von 5 % und einem Freiheitsgrad (3,84), dann liegt mit der Irrtumswahrscheinlichkeit P ein Risikofaktor vor (die Nullhypothese, dass kein Unterschied zwischen Fall- und Kontrollgruppe besteht, wird abgelehnt). Der Chi-Quadrat-Test wird mit der Funktion `chisq.test` aus dem R-Paket „Stats“ (Version 3.6.2) berechnet.

Tabelle 12: Bewertung der Odds Ratio hinsichtlich der Exposition gegenüber dem (Risiko-) Faktor (nach Hedderich und Sachs (2016)).

| Odds Ratio (OR) | Exposition |
|-----------------|-----------------|
| ≥ 2,6 | Starker Schaden |
| 1,2 – 2,5 | Schaden |
| 0,9 – 1,1 | Kein Effekt |
| 0,4 – 0,8 | Nutzen |
| ≤ 0,3 | Starker Nutzen |

4.6.2 Grenzwertbestimmung Pollenkonzentration

Da für die Auswertung der Pollenbelastung keine Kontrollgruppe mit gesunden Personen zur Verfügung steht, wird die Methodik entsprechend angepasst. Anstelle einer Kontrollgruppe wird die Morbidität an Tagen mit hoher Pollenkonzentration mit der Morbidität an Tagen mit geringer Pollenkonzentration verglichen. Dafür werden je nach Pollenart Grenzwerte festgelegt, die

bei Überschreitung einen Tag mit hoher Konzentration, also einen möglichen Risikofaktor, markieren. Grenzwerte für eine medizinisch relevante Pollenbelastung sind international sehr verschieden (de Weger et al. 2013). Hier verwendete Grenzwerte für die Pollenarten Birke und Gräser werden angelehnt an den Pollenflug-Gefahrenindex des DWD (DWD 2019). Die Grenzwerte für eine Belastung durch Pollen liegt für Birkenpollen bei 50 Pollenkörnern pro m^3 (P / m^3), für Gräserpollen bei 30 P / m^3 . Nach den Empfehlungen von Pfaar et al. (2017) werden zusätzlich noch Tage mit einer höheren Belastung von über 100 Birkenpollen / m^3 und von über 50 Gräserpollen / m^3 verwendet. Im Vergleich der fünf Messstationen zeigen sich jedoch sehr unterschiedliche Konzentrationen vor allem an Birkenpollen, so liegen die Werte der Birkenpollenkonzentration in Dresden um ein Vielfaches höher als z. B. an der Station Freiburg. Durch diese Unterschiede wird die Verwendung von festen Grenzwerten für alle fünf Stationen schwierig. Daher werden zusätzlich Perzentile als Grenzwerte verwendet. Diese können den Unterschied der Pollenkonzentrationen der Stationen abbilden. Da eine Behandlung im Krankenhaus in der Regel eine höhere Krankheitslast voraussetzt als beispielsweise ein Besuch beim Hausarzt, werden für den Zusammenhang mit Krankenhausaufnahmen grundsätzlich höhere Grenzwerte der Pollenbelastung getestet.

4.6.3 Pollensaisonbestimmung

Die Auswertung der Pollenbelastung gilt innerhalb einer definierten Pollensaison, die für jede Pollenart und Region individuell bestimmt wird. Die Saisonbestimmung wird mit der Standarddefinition des European Aeroallergen Network (EAN) durchgeführt. Der Start der Saison ist definiert als der Tag, an dem 1 % des jährlichen Pollenintegrals (Annual Pollen Integral, API) erreicht wurde, das Ende der Saison ist an dem Tag des 95 % des API (Bastl et al. 2015; Bastl et al. 2018b). Die Morbidität außerhalb der Pollensaison wird aufgrund von anderen Einflussfaktoren wie z. B. dem Jahresgang und anderen Allergenen wie Pilzsporen aus der Analyse ausgeschlossen.

4.6.4 Grenzwertbestimmung Asthmafälle während Pollenbelastung

Die Anzahl der Krankenhausaufnahmen mit Asthma bronchiale wird als bevölkerungsbasierte Rate für Baden-Württemberg verwendet. Als Grenzwert zwischen „geringer Morbidität“ (Krankheit Nein) und „hoher Morbidität“ (Krankheit Ja) gilt das 80. Perzentil über die Fälle innerhalb der Pollensaison. Das bedeutet, dass nur Tage innerhalb der jeweiligen Birken- bzw. Gräserpollensaison, an denen die Morbidität über dem 80. Perzentil liegt, als mögliche Reaktion auf eine hohe Pollenbelastung gewertet werden. Die Wahl des 80. Perzentils wird durch mehrere Faktoren begründet: Wie der Jahresgang der Asthmafälle zeigt, liegen die Fallzahlen im Frühling und Herbst höher als im restlichen Jahr (siehe Kapitel 2.2). Dadurch ist während der gesamten Pollensaison bereits eine erhöhte Rate zu verzeichnen. Die Wahl des in der Literatur üblichen 90. Perzentils führt jedoch zu einer zu geringen Auswahl von Tagen mit hoher Morbidität (Rate > 90. Perzentil), was keine Auswertung der Kontingenztafel mehr ermöglicht. Die Schätzung des Risikofaktors mittels der Odds Ratio ist umso genauer, desto geringer die Inzidenzraten in den Gruppen (Exposition gegenüber dem Risikofaktor ja / nein) sind. D. h. die linke Seite der Kontingenztafel (Fallzahlen a und c) sollte möglichst klein sein gegenüber der rechten Seite der Kontingenztafel (Fallzahlen b und d) (Hedderich und Sachs 2016). Dies wird durch die Wahl eines immer noch hohen Perzentilwertes (80. Perzentil) gewährleistet.

Um einen möglichen andauernden Effekt der Pollenbelastung abschätzen zu können, werden die Berechnungen ein weiteres Mal durchgeführt, bei denen zusätzlich zu der Morbidität am Tag der hohen Pollenbelastung ebenfalls die Morbidität am Tag danach berücksichtigt wird (Lag-Effekt von einem Tag).

5 Ergebnisse

5.1 Gesamteffekt der Temperatur

5.1.1 Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen

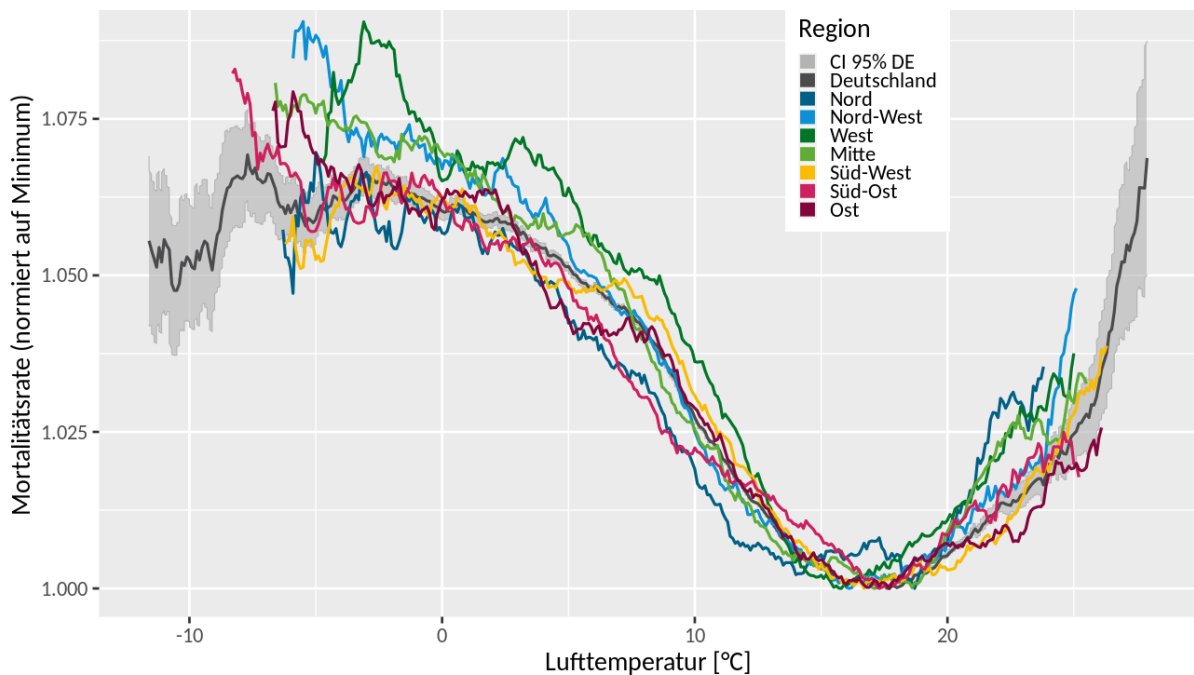
5.1.1.1 Retrospektive Analyse

Todesfälle aufgrund von Atemwegserkrankungen liegen als zusammengefügte Gruppe der Todesursachen J40 – J47 (chronische Erkrankungen der unteren Atemwege, CLRD) vor. Diese Gruppe enthält die Krankheitsbilder COPD (J44), Asthma bronchiale (J45 – J46) sowie nicht akute Bronchitis (J40 – J42), Emphyseme (J43) und Bronchiektasen (J47). In Deutschland lag die Zahl der Todesfälle mit diesen Ursachen im Jahr 2015 bei 35 095, davon fallen 88,5 % auf die Diagnose COPD und ca. 3 % haben Asthma bronchiale als Ursache (Destatis 2017). Über die Jahre 2001 bis 2015 ist ein ansteigender Trend der Mortalitätsrate zu erkennen. Der Jahresgang mit einem deutlichen Maximum im Winter und einem Minimum im Sommer ist in manchen Jahren stärker als in anderen. Doch auch im Sommer sind Anstiege der Mortalitätsrate zu erkennen, die auf die Hitzeperioden der Sommer 2003, 2006, 2010 und 2015 fallen (siehe Abbildung 13). Aufgrund der geringen Anzahl der Sterbefälle in der Gruppe J40 – J47, liegen die Daten als Zweitagesmittelwerte vor. Die folgenden Analysen basieren somit auch auf einem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur bzw. dem Humidex.

Bei der Verwendung der Mortalitätsraten ergibt sich eine typische V-förmige Beziehung zur thermischen Umwelt, der Bereich mit der minimalen Sterblichkeit liegt für die sieben Großregionen Deutschlands zwischen 15,8 °C und 18,7 °C Lufttemperatur (Zweitagesmittelwerte, Abbildung 19). Die vom Minimum in Richtung abnehmender Temperaturwerte, linke Seite ist von einem längeren, z. T. aber etwas flacheren Anstieg geprägt als die in Richtung zunehmende Temperaturwerte rechte Seite des V. Die Sterblichkeit nimmt unterhalb des Minimums fast linear um ca. 0,4 % pro abnehmende °C zu, unterhalb von ca. 0 °C sind die Kurven aber deutlich flacher. Oberhalb der minimalen Sterblichkeit steigen die Kurven ebenfalls nahezu linear um ca. 0,6 % pro °C an. Die Steigungen in den niedrigen und höheren Temperaturbereichen sind für alle sieben Großregionen signifikant.

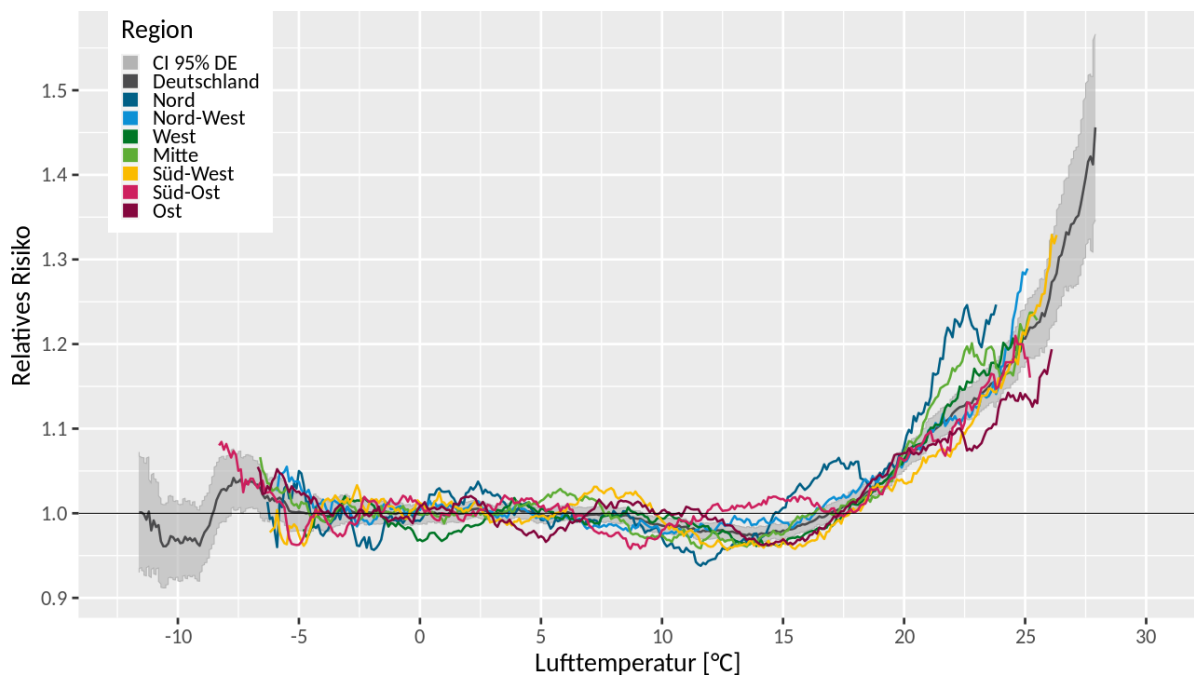
Die Darstellung einer thermischen Abhängigkeit der Mortalitätsrate ist stark vom Jahresverlauf in den sieben Großregionen beeinflusst, da noch keine Korrektur des Jahresganges durchgeführt wurde. Sie bestätigt eine steigende Rate bei abnehmenden Temperaturwerten, die jedoch aufgrund von witterungsunabhängigen Faktoren überschätzt wird. Der Anstieg bei erhöhter Temperatur wird aufgrund der geringeren Fallzahl im Sommer dagegen stark unterschätzt. Dies zeigt sich bei der Betrachtung der Beziehung zwischen dem Relativen Risiko und der thermischen Umwelt (Abbildung 20, Tabelle 13). Auffällig ist hier, dass im niedrigen Lufttemperaturbereich das Relative Risiko nur sehr schwach ansteigt, in der Region Nord-West wird die Steigung nicht signifikant (zur Berechnung des Relativen Risikos bzw. der Methodik, siehe Kapitel 4.4). Der untere Schwellenwert (SWu) von RR reicht in den übrigen Regionen von - 7,6 °C im Süd-Osten bis zu 8,9 °C (Zweitagesmittelwerte) im Süd-Westen. Hier zeigt sich eine stärkere Kältesensitivität in Mittel- und Südwestdeutschland (hohe SWu); eine bessere Kälteadaptation ist im Norden und Osten zu erkennen (niedrige SWu). Im Bereich der Zweitagesmittelwerte von ca. - 8 °C zeigt das Deutschlandmittel und die Region Süd-Ost trotz niedriger SWu eine um 3 % (RR = 1,03) bzw. 8 % (RR = 1,08) erhöhte Mortalität. In den restlichen Regionen liegen bei diesen Lufttemperaturwerten nicht mehr ausreichend Todesfälle zur Analyse vor.

Abbildung 19: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und der 2-tägigem Mortalitätsrate aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in den Jahren 2001 - 2015 für sieben Großregionen und den Deutschlandmittelwert. *



* Anmerkung: Für eine bessere Vergleichbarkeit der regionalen Kurven wurde das jeweilige Minimum der Mortalitätsrate gleich eins gesetzt. Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; DE, Deutschlandmittelwert. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 20: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in den Jahren 2001 - 2015 für sieben Großregionen und den Deutschlandmittelwert.



Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; DE, Deutschlandmittelwert. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle 13: Schwellenwerte, Minimum und Steigung des Relativen Risikos der Mortalität von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47).

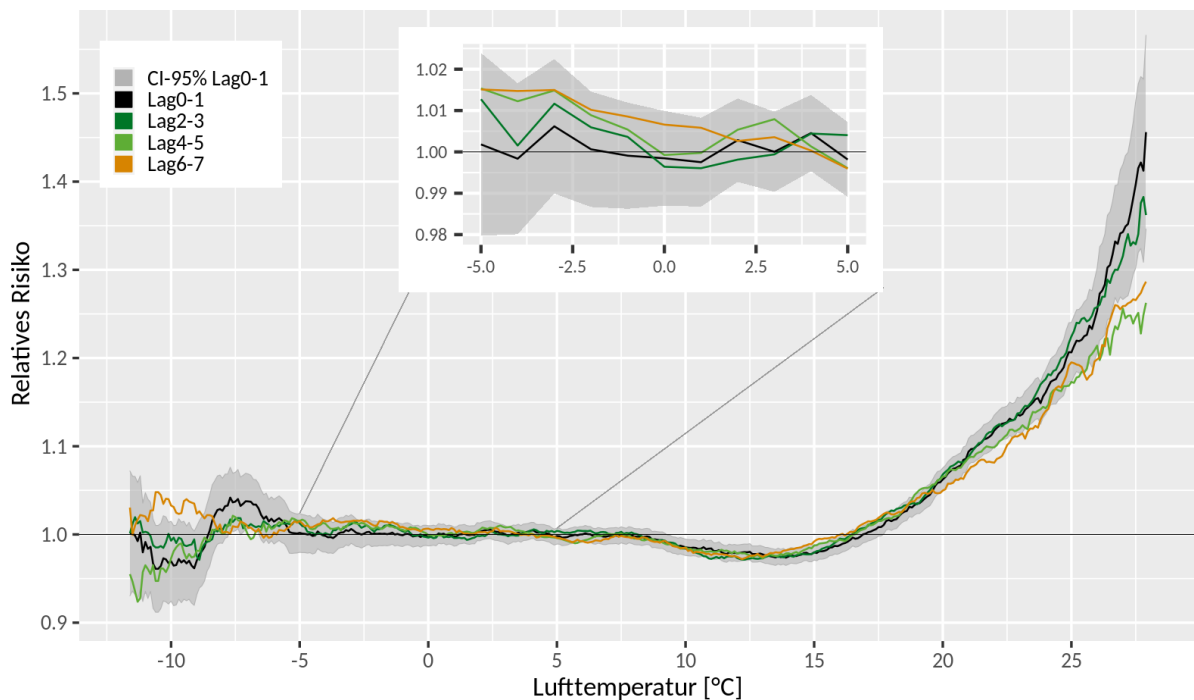
| Region | Unterer Schwellenwert (SWu) [°C] | Minimum von RR | Lufttemperatur bei minimalem RR | Oberer Schwellenwert (SWo) [°C] | Steigung oberhalb des SWo [%] |
|-------------|----------------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Deutschland | -6,6 | 0,96 | 14,0 | 17,7 | 3,6 |
| Nord | 2,5 | 0,94 | 11,6 | 15,6 | 2,9 |
| Nord-West | - | 0,97 | 11,1 | 17,5 | 2,9 |
| West | 3,9 | 0,96 | 14,8 | 18,4 | 3,0 |
| Mitte | 6,3 | 0,96 | 11,6 | 19,1 | 2,9 |
| Süd-West | 8,9 | 0,96 | 12,7 | 18,7 | 3,6 |
| Süd-Ost | -7,6 | 0,96 | 8,7 | 18,6 | 2,6 |
| Ost | -5,7 | 0,96 | 14,4 | 18,3 | 1,6 |

Der obere Schwellenwert (SWo) liegt zwischen 15,6 °C und 19,1 °C (Zweitagesmittelwert), hier zeigt sich die höhere Wärmeadaptation in Mittel- und Süddeutschland, im Norden ist der Schwellenwert etwas geringer (Tabelle 13). Wird der Humidex für die Beziehung zur thermischen Umwelt herangezogen, liegt die minimale Mortalitätsrate bei etwas höheren Werten, die Steigungen sind ähnlich und ebenfalls signifikant (Tabelle A 8).

Die Steigung vom RR oberhalb dieses Schwellenwertes zeigt jedoch auch, dass trotz eines höheren SWo, das Risiko bei zunehmender Hitze stark ansteigen kann. Die Zunahme der Mortalität oberhalb des SWo liegt zwischen 1,6 % und 3,6 % pro °C. Der Mittelwert für Deutschland ebenso wie die Region Süd-West weisen einen Anstieg um 3,6 % pro °C auf, der Schwellenwert liegt in der Region Süd-West jedoch mit 18,7 °C etwas höher als der gemittelte Wert von 17,7 °C für Deutschland. Liegt die Lufttemperatur über 26 °C (Zweitagesmittelwert) liegt in der Region Süd-West das größte Relative Risiko mit einer zusätzlichen Sterblichkeit von bis zu 33 % im Vergleich zum Erwartungswert. Die Region Nord weißt bereits ab ca. 22 °C eine um 20 % erhöhte Mortalität auf und liegt damit über allen anderen Regionen. Auch die Region Nord-West zeigt bei knapp 25 °C Zweitagesmittel-Lufttemperatur ein stark erhöhtes Risiko von knapp 30 %. Die Kurven enden jedoch unter bzw. bei 25 °C, da in den Temperaturintervallen oberhalb nicht mehr genügend Fälle zur Auswertung vorliegen (Fallzahl < 30). Der Süd-Osten und Osten Deutschlands ist am wenigsten von hitzebedingter Mortalität betroffen, pro °C steigt die Sterblichkeit um 2,6 % bzw. 1,6, an heißen Tagen ist im Osten im Vergleich zu den anderen Regionen das Relative Risiko der Mortalität am geringsten. Die Region Ost zeigt die schwächste Steigung oberhalb eines relativ hohen Schwellenwertes auf, dies deutet also auf eine geringere Hitzesensibilität hin.

Die Literatur zeigt, dass der Zusammenhang zwischen der thermischen Umwelt und der Gesundheit deutlicher zu erkennen ist, wenn eine zeitliche Verzögerung im niedrigen Temperaturbereich berücksichtigt wird (Lag-Effekt). Dagegen rufen hohe Temperaturwerte meist eine direkte Reaktion hervor. Bei der CLRD-Mortalität ist zu erkennen, dass mit einer zeitlichen Verzögerung von sechs bis neun Tagen (Lag 6 – Lag 8 der Zweitagesmittelwerte) ein deutlich höheres Relatives Risiko an sehr kalten Tagen vorliegt als mit keiner oder nur zwei Tagen Verzögerung (Abbildung 21). Bereits im Bereich der Zweitagesmittelwerte der Lufttemperatur zwischen 5 °C und – 5 °C ist zu erkennen, wie das Relative Risiko mit einer zeitlichen Verzögerung ansteigt.

Abbildung 21: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) für zeitliche Verschiebungen von 0 bis 9 Tage für die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland.



Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

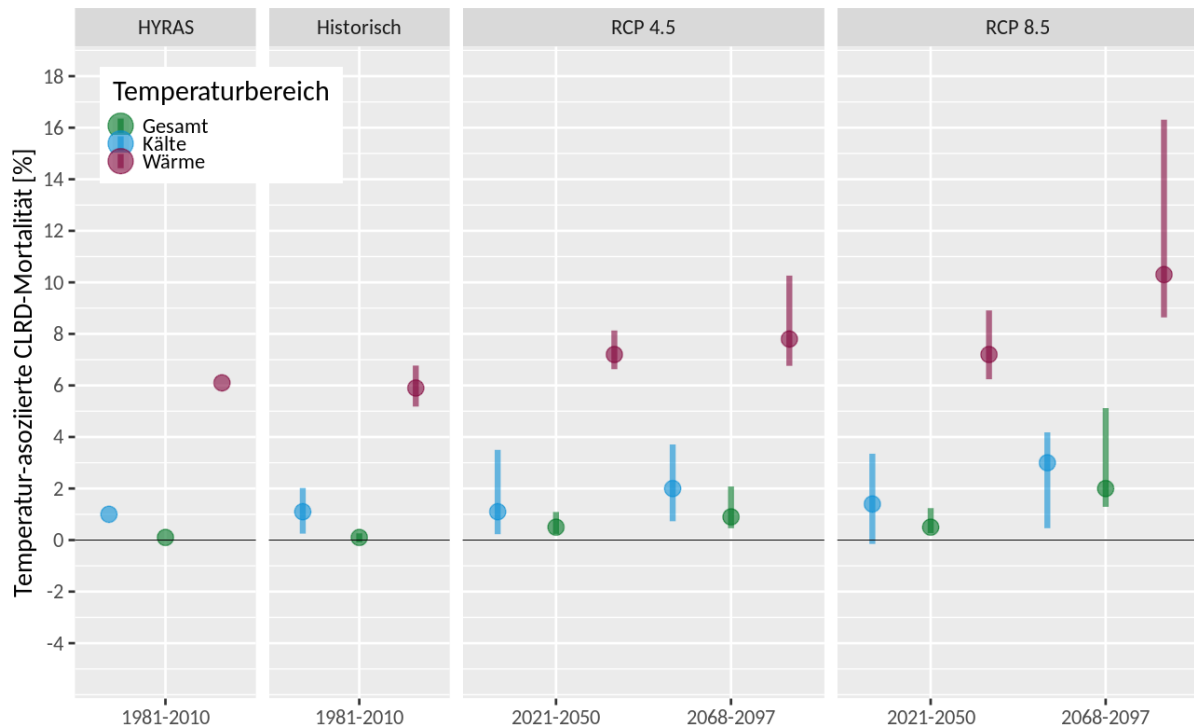
Oberhalb von ca. 25 °C führt die zeitliche Verzögerung zu einem deutlich geringeren Risiko. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass die Unsicherheit von RR an den extrem kalten oder heißen Tagen hoch ist (breites Konfidenzintervall von Tag 0 in grau) und die Unterschiede in der zeitlichen Verzögerung in diesen Extrembereichen nicht überschätzt werden dürfen.

5.1.1.2 Auswirkungen des Klimawandels

Ausgehend von den statistischen Zusammenhängen zwischen der Lufttemperatur und der CLRD-Mortalität, wird die zukünftige gesundheitliche Belastung abgeschätzt. Die Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) beschreibt dabei die Abweichung der Mortalitätsrate (Fälle / 100 000 Personen) vom Erwartungswert, die dem Einfluss der Lufttemperatur zugeschrieben wird. Die Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) wird sowohl für den gesamten Temperaturbereich als auch für den Bereich des Kälteeffekts und des Wärmeeffekts getrennt angegeben. Dabei gilt zu beachten, dass Kälte- und Wärmeeffekt zusammen genommen nicht den gesamten Temperaturbereich abdecken, sondern nur Ausschnitte davon bilden. Der historische Ensemble-Median zeigt für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 eine TAM aufgrund von CLRD von 0,1 % (Abbildung 22, Tabelle 14). Das bedeutet, die Mortalität ist aufgrund der Lufttemperatur um 0,1 % erhöht.

Da diese Zahl hier für den gesamten Temperaturbereich gilt wird deutlich, dass bereits im Referenzzeitraum ein erhöhtes Risiko vorliegt, trotz der geringeren Häufigkeit der Temperaturklassen mit erhöhtem RR im Vergleich zu reduziertem Risiko im mittleren Temperaturbereich mit hoher Häufigkeit der Temperaturklassen.

Abbildung 22: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) aufgrund von CLRD in Deutschland im Referenzzeitraum 1981 – 2010 (Vergleich HYRAS und historische Ensemble-Daten) und bis zum Ende des Jahrhunderts für zwei Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Dargestellt als Punkt (HYRAS) bzw. als Ensemble-Median (Punkt) im Wertebereich des Ensembles (vertikaler Balken) für die gesamte Temperaturspanne (grün), den Kältebereich (blau) und Wärmebereich (rot).



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Die mit der Kälte assoziierte Mortalität (Kälte-TAM) ist um 1,0 % erhöht, die mit Wärme assoziierte Mortalität bereits um 5,9 %. Diese Verteilung spiegelt den Verlauf des RR über den Temperaturbereich gut wider (Abbildung 20). Die Abweichungen der TAM-Werte desselben Zeitraumes berechnet mit den HYRAS-Daten sind sehr gering (Tabelle 14), so dass angenommen werden kann, dass die Ensemble-Daten die Beobachtungen gut widerspiegeln.

Mit dem RCP4.5-Szenario zeigt TAM eine Zunahme von 0,4 % in der nahen Zukunft (2021 – 2050) auf von 0,8 % in der fernen Zukunft (2068 – 2097). Dieser Anstieg lässt sich durch die steigende Häufigkeit der warmen und heißen Temperaturklassen mit einem erhöhten Risiko erklären (Abbildung 23). Mit dem RCP8.5-Szenario fällt der Anstieg stärker aus, die TAM liegt bei 0,5 % bis Mitte und bei 2,0 % (+ 1,9 %) bis Ende des Jahrhunderts. In Abbildung 22 sind zusätzlich zum Ensemble-Median die Bandbreite des Ensembles (Minimum und Maximum) angegeben um den Median einschätzen zu können. Die Bandbreite der Ensembles ist vor allem bei der Verwendung des gesamten Temperaturbereiches gering und wird erst im Zeitraum der fernen Zukunft größer, vor allem beim RCP8.5-Szenario. Die regionalen Ensemble-Mediane der TAM für den Referenzzeitraum liegen zwischen -0,3 % und 0,7 %, in den Regionen West und Süd-West liegt damit ein reduziertes Risiko aufgrund der Lufttemperatur vor. In der Region Süd-Ost liegt mit 0,7 % der höchste TAM-Wert vor. Die Änderungssignale betragen maximal + 1,3 % und bis + 2,3 % (RCP8.5 2068 – 2097) für den gesamten Temperaturbereich.

Tabelle 14: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) [%] aufgrund chronischer unterer Atemwegserkrankungen (CLRD) im Referenzzeitraum (HYRAS und Ensemble-Daten) sowie die Veränderung für die Zukunftszeiträume bezogen auf den Referenzzeitraum.

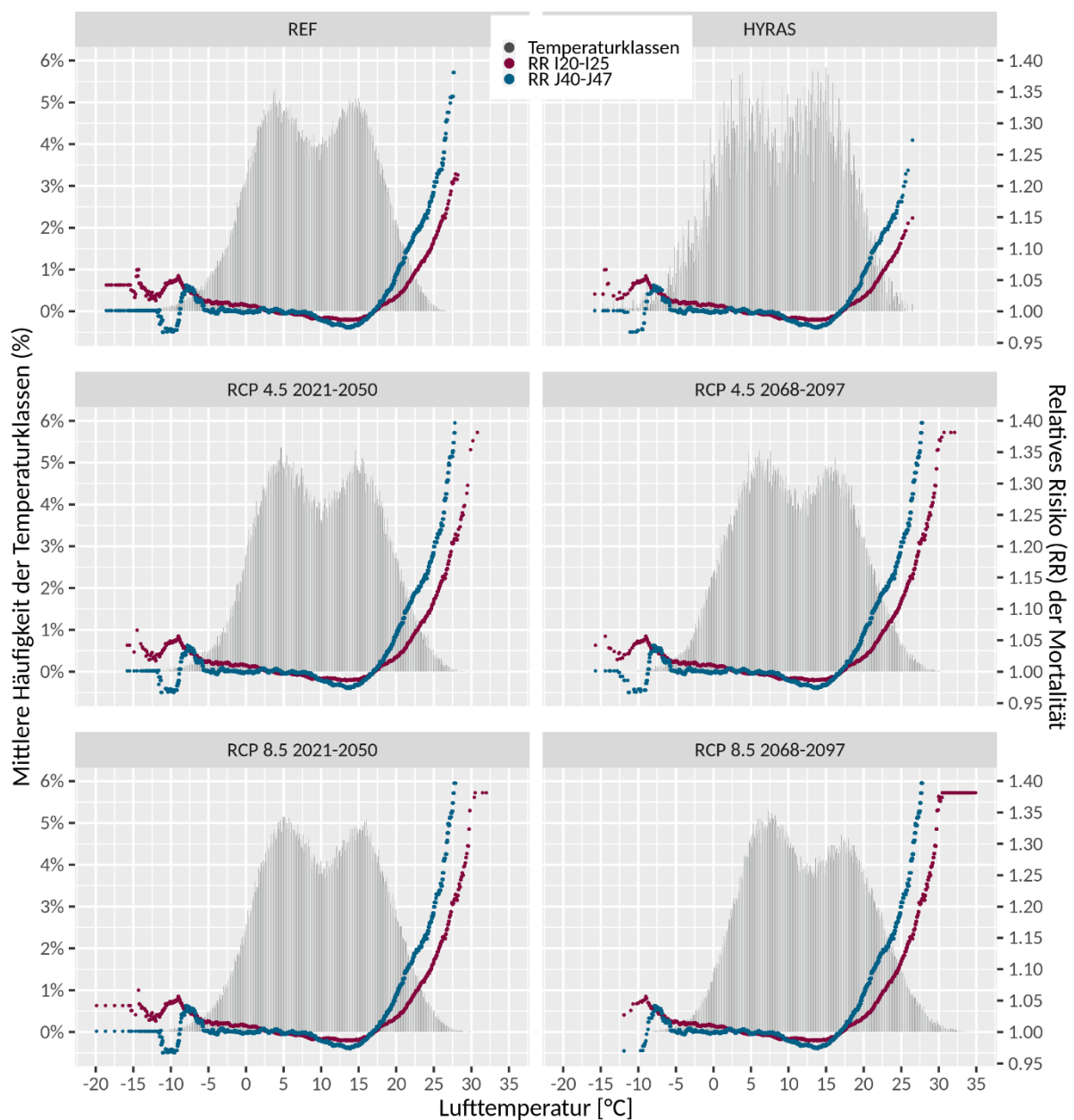
| Region | Temperatur-be-reich | 1981 - 2010 | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|-------------|---------------------|-------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | HYRAS | Hist. En-semble | 2021 – 2050 | 2068 – 2097 | 2021 – 2050 | 2068 – 2097 |
| Deutschland | Gesamt | 0,1 | 0,1 | + 0,4 | + 0,8 | + 0,4 | + 1,9 |
| | Kälte | 1,0 | 1,1 | ± 0,0 | + 0,9 | + 0,3 | + 1,9 |
| | Wärme | 6,1 | 5,9 | + 1,3 | + 1,9 | + 1,3 | + 4,4 |
| Nord | Gesamt | 0,6 | 0,6 | + 0,6 | + 0,9 | + 0,7 | + 2,2 |
| | Kälte | 0,6 | 0,7 | + 0,0 | + 0,2 | + 0,1 | + 0,3 |
| | Wärme | 7,3 | 6,9 | + 0,9 | + 1,4 | + 0,9 | + 3,2 |
| Nord-West | Gesamt | 0,4 | 0,3 | + 0,3 | + 0,6 | + 0,3 | + 1,4 |
| | Kälte | - | - | - | - | - | - |
| | Wärme | 6,7 | 6,6 | + 1,1 | + 1,5 | + 1,1 | + 3,1 |
| West | Gesamt | -0,3 | -0,3 | + 0,4 | + 0,8 | + 0,4 | + 1,9 |
| | Kälte | -1,1 | -1,1 | ± 0,0 | ± 0,0 | ± 0,0 | + 0,1 |
| | Wärme | 8,2 | 8,4 | + 1,2 | + 1,8 | + 1,2 | + 3,5 |
| Mitte | Gesamt | 0,4 | 0,3 | + 0,4 | + 0,8 | + 0,5 | + 1,8 |
| | Kälte | 0,8 | 0,8 | - 0,1 | - 0,1 | - 0,1 | ± 0,0 |
| | Wärme | 10,7 | 10,8 | + 1,4 | + 2,0 | + 1,4 | + 3,7 |
| Süd-West | Gesamt | -0,1 | -0,2 | + 0,4 | + 1,0 | + 0,5 | + 2,3 |
| | Kälte | 0,6 | 0,6 | ± 0,0 | + 0,1 | ± 0,0 | + 0,2 |
| | Wärme | 6,0 | 6,0 | + 1,7 | + 2,6 | + 1,8 | + 5,6 |
| Süd-Ost | Gesamt | 0,8 | 0,7 | + 0,4 | + 0,6 | + 0,4 | + 1,4 |
| | Kälte | 7,9 | 7,9 | ± 0,0 | ± 0,0 | ± 0,0 | ± 0,0 |
| | Wärme | 7,1 | 6,8 | + 1,4 | + 2,0 | + 1,3 | + 3,3 |
| Ost | Gesamt | 0,4 | 0,3 | + 0,3 | + 0,5 | + 0,3 | + 1,3 |
| | Kälte | 5,0 | 5,0 | - 0,1 | - 0,1 | ± 0,0 | - 0,2 |
| | Wärme | 7,2 | 7,1 | + 0,7 | + 1,1 | + 0,8 | + 2,2 |

Anmerkungen: In fett markiert sind signifikante Änderungssignale. Für Region Nord-West konnte kein unterer Schwellenwert in der retrospektiven Analyse gefunden werden, daher wird keine Kälte-TAM berechnet.

Wird nur der Lufttemperaturbereich betrachtet, der den Wärmeeffekt umfasst, zeigen die Ensemble-Daten einen starken Anstieg der TAM von 5,9 % historisch (Referenzensemble im Referenzzeitraum) auf 7,2 % (+ 4,4 %) in der nahen Zukunft und auf 7,8 % (RCP4.5) bis 10,3 %

(RCP8.5) in der fernen Zukunft. Damit ist ein prozentualer Anstieg der Wärme-assoziierten Mortalität um ca. 75 % bis Ende des Jahrhunderts mit dem „weiter-wie-bisher“-Szenario zu erwarten. Regional liegen die Ensemble-Mediane historisch zwischen 6,0 % und 10,8 % und damit tendenziell höher als der Wert für gesamt Deutschland. Die Bandbreite der Ensembles ist größer als bei der TAM des gesamten Temperaturbereiches. Der Anstieg der Wärme-TAM bis Mitte und Ende des Jahrhunderts ist sowohl im Deutschlandmittelwert als auch in den einzelnen Regionen für beide Szenarien signifikant. Die Region Mitte verzeichnet den höchsten Wärme-TAM-Wert von 14,5 % am Ende des Jahrhunderts (RCP8.5). In der Region Süd-West dagegen ist der stärkste Anstieg im Vergleich zum Referenzzeitraum mit einem Plus von 5,6 % bis 2068 – 2097 zu erkennen.

Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur in 0,1 °C-Klassen des historischen Ensembles (REF), der Beobachtungsdaten (HYRAS) und der Ensembles der beiden RCP-Szenarien in jeweils zwei Zukunftszeiträumen 2021-2050 und 2068-2097.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Wird der Kältebereich zur Berechnung der TAM herangezogen, zeigt sich eine leichte Zunahme der TAM im Deutschlandmittel über die beiden Szenarien und die drei Zeiträume. Diese Zunahme ist jedoch nicht signifikant, da weniger als 66 % der Ensemble-Member eine signifikante Änderung zwischen den Zeiträumen angeben (Tabelle 14).

Auch regional sind die Änderungen der TAM zwischen den Zeiträumen nur in sehr wenigen Fällen signifikant (Regionen West, Mitte, Süd-West, RCP8.5 Zeitraum 2068 – 2097). Die große Bandbreite der Ensemblewerte zeigt bereits im Referenzzeitraum die Unsicherheit des Ensemble-Medians an. Dass es trotz der Abnahme von kalten Tagen zu einer Zunahme der TAM kommt, lässt sich mit dem Kurvenverlauf des RR aufgrund von CLRD erklären. Diese Kurve weist keine kontinuierliche Zunahme des Risikos in Richtung tieferer Temperaturen auf, sondern hat ein Minimum bei Temperaturen um -10 °C. In den Zukunftszeiträumen treten diese Temperaturklassen deutlich seltener oder gar nicht mehr auf (Abbildung 23). Der Kurvenverlauf im kalten Bereich ist für die CLRD-Mortalität grundsätzlich fragwürdig und die Aussagekraft der Ergebnisse daher eingeschränkt (siehe Abbildung 20).

5.1.2 Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (IHK)

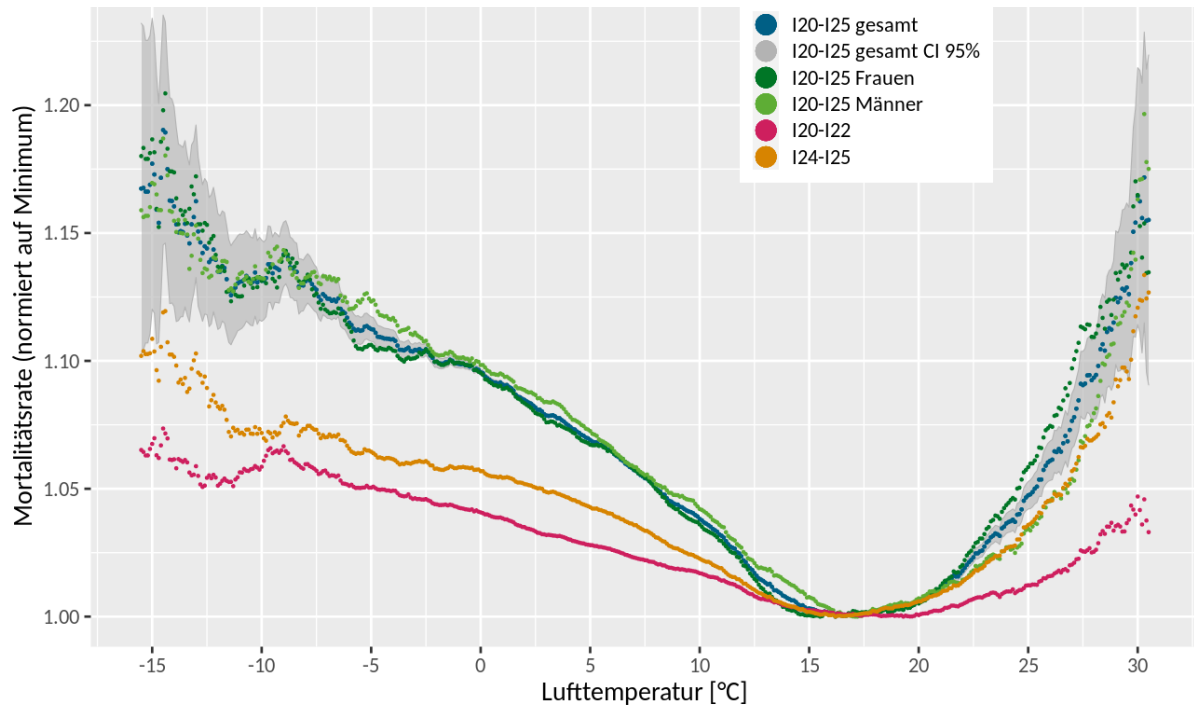
5.1.2.1 Retrospektive Analyse

Die Mortalitätsdaten zu ischämischen Herzerkrankungen (IHK) liegen als Gesamtdiagnosegruppe und in Untergruppen vor. Dies ermöglicht eine Unterscheidung von Todesursachen aufgrund von Myokardinfarkten und Angina Pectoris (I20 – I22), sonstigen akuten oder chronischen ischämischen Herzerkrankungen (I24 – I25) und den Vergleich der Betroffenheit in der weiblichen und männlichen Bevölkerung. Die Mortalitätsrate von ischämischen Herzerkrankungen zeigt über die Jahre 2001 bis 2015 einen abnehmenden Trend. Der Jahresgang weist wie bei den Atemwegserkrankungen das Maximum im Winter und das Minimum im Sommer auf, die Amplitude schwankt mit den Jahren.

Auch bei den ischämischen Herzerkrankungen zeigt die Mortalitätsrate einen V-förmigen Zusammenhang mit dem Tagesmittel der Lufttemperatur (Abbildung 24). Die minimale Mortalitätsrate liegt bei der Gesamtgruppe zwischen 15,5 °C und 17,2 °C, die Unterschiede zwischen der gesamten, weiblichen und männlichen Bevölkerung sind nicht signifikant. Die Gruppe I24 – I25 hat ein Minimum bei 16,2 °C, die minimale Sterblichkeit bei Myokardinfarkten (I21 – I23) liegt erst bei 19,3 °C. Die Steigungen der Raten links und rechts des Minimums fallen bei den zusammengefassten Todesursachen sowohl in der gesamten als auch in der männlichen oder weiblichen Bevölkerung gleich aus. Im Vergleich zur Mortalitätsrate der Atemwegserkrankungen ist der Anstieg der Sterbefallrate von 1,2 % pro °C zunehmender Temperatur höher als mit abnehmender Temperatur, wo die Rate um 0,9 % pro °C abnehmende Temperatur steigt. Die Steigungen der I20 – I22-Mortalitätsrate sind am geringsten sowohl im höheren, als auch im niedrigen Temperaturbereich, die I24 – I25-Raten haben ebenfalls schwacher ausgeprägte Ansteige, sind aber etwas stärker als bei I20 – I22 (Abbildung 24).

Bei der Betrachtung der Mortalitätsraten muss beachtet werden, dass der Einfluss witterungsunabhängiger Faktoren weiterhin vorhanden ist. Um eine Abschätzung der Beziehung zwischen Mortalität und thermischer Umwelt ohne den Einfluss des Jahresganges zu bekommen, wird das Relative Risiko betrachtet (Abbildung 25). Dieses zeigt, ähnlich wie bei der Mortalität der Atemwegserkrankungen im Bereich niedriger Lufttemperaturbereiche ein nur schwach erhöhtes RR unterhalb von ca. 3 °C. Zwischen ca. 3 °C und 17 °C ist das Relative Risiko für alle ischämischen Herzerkrankungen gleich dem oder geringer als der Erwartungswert, die Fallzahlen liegen also unterhalb dessen, was für die Jahreszeit eigentlich zu erwarten ist.

Abbildung 24: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und der Mortalitätsrate aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen getrennt nach ICD-Gruppen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland. *



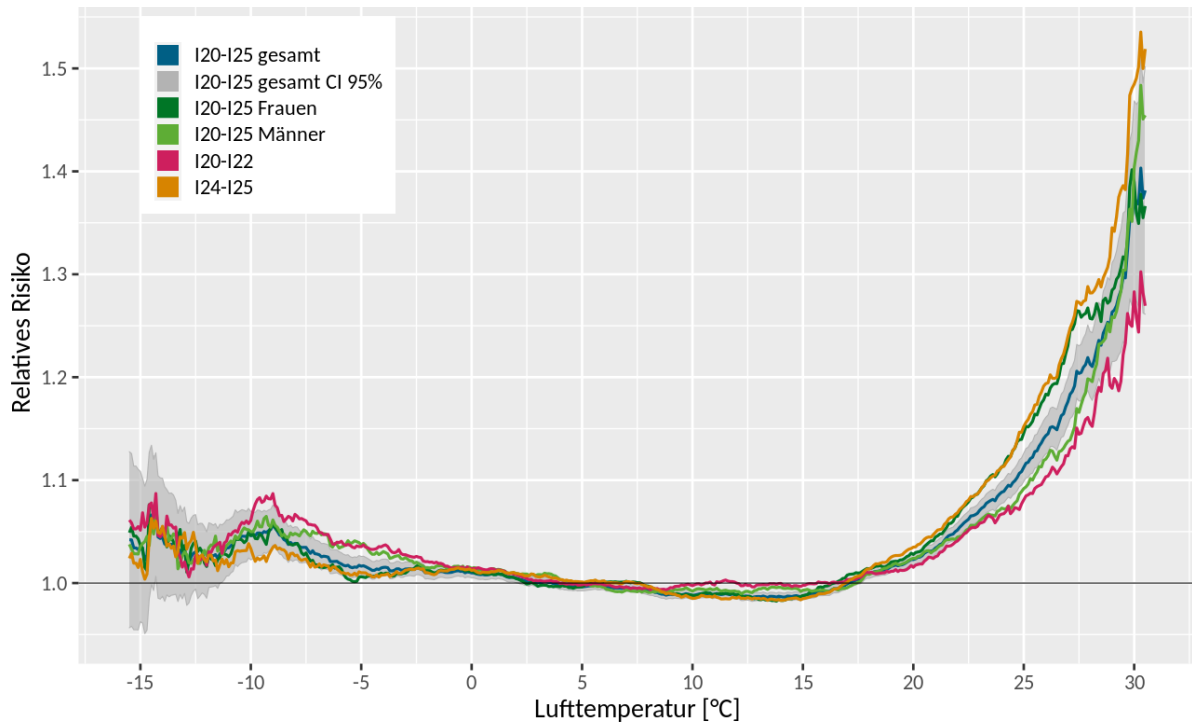
* Für eine bessere Vergleichbarkeit der Kurven wurde das jeweilige Minimum der Mortalitätsrate auf eins gesetzt.

Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; I20 – I25, ischämische Herzerkrankungen; I20 – I22, Angina Pectoris und akuter sowie rezidivierender Myokardinfarkt; I24 – I25, sonstige und chronische ischämische Herzkrankheit. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Oberhalb von ca. 17,6 °C (oberer Schwellenwert von I20 – I25 Gesamt) nimmt das Relative Risiko jedoch mit 2,6 % pro °C Lufttemperaturanstieg stark zu. Die lineare Steigung oberhalb des S_{Wo} gibt jedoch nur näherungsweise den eher exponentiellen Anstieg des RR an. Dennoch zeigt die Steigung von 2,6 % pro °C an, dass ischämische Herzerkrankungen im Vergleich zu den chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (lineare Steigung oberhalb des S_{Wo} von 3,6 % pro °C) weniger stark auf warme und heiße Tage reagieren. Bei Tagesmittelwerten von ca. 27,4 °C ist das Relative Risiko bereits um 20 % erhöht. Das maximale RR in der männlichen Bevölkerung liegt zwar höher als das der weiblichen Bevölkerung, die Steigung oberhalb des S_{Wo} ist in der weiblichen Bevölkerung allerdings etwas steiler und das Risiko im Bereich zwischen ca. 20 °C und 30 °C höher als das der Männer. Das höchste Hitzerrisiko liegt bei der ICD-Gruppe I24 – I25, diese weist aber das geringste Kälterisiko auf. Andersherum ist es bei der ICD-Gruppe I20 – I22, die das geringste Hitzerrisiko zeigt, jedoch das höchste Risiko im kalten Lufttemperaturbereich.

Die Unterscheidung des Relativen Risikos der Mortalität in sieben Großregionen in Deutschland zeigt fast über alle ICD-Gruppen eine gute Kälteadaptation in den Regionen Süd-Ost und Ost, da der untere Schwellenwert (RR > 1) niedriger ist als in den anderen Regionen (Tabelle 15). Die Region Mitte weist dagegen eine hohe Kältesensitivität auf, hat aber zusammen mit der Region Süd-West oft einen der höchsten oberen Schwellenwerte, was auf eine gute Hitzeadaptation hindeutet.

Abbildung 25: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen getrennt nach ICD-Gruppen in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschland.



Erläuterungen CI, Konfidenzintervall; I20 – I25, ischämische Herzerkrankungen; I20 – I22, Angina Pectoris und akuter sowie rezidivierender Myokardinfarkt; I24 – I25, sonstige und chronische ischämische Herzkrankheit. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle 15: Untere (SWu) und obere (SWo) Schwellenwerte der Lufttemperatur (T_a , jeweils Tagesmittelwert in °C) für die das Relative Risiko der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) über den Erwartungswert steigt und Steigungen von RR oberhalb der SWo.

| Region | Unterer Schwellenwert (SWu) [°C] | Minimum von RR | Lufttemperatur bei minimalem RR | Oberer Schwellenwert (SWo) [°C] | Steigung oberhalb SWo [%/°C T_a] |
|-------------|----------------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Deutschland | 2,1 | 0,98 | 12,9 | 17,6 | 2,6 |
| Nord | 1,1 | 0,99 | 11,0 | 20,0 | 2,8 |
| Nord-West | 2,0 | 0,98 | 8,8 | 17,7 | 1,7 |
| West | 2,6 | 0,98 | 12,6 | 18,5 | 2,7 |
| Mitte | 4,1 | 0,97 | 10,2 | 19,0 | 1,7 |
| Süd-West | 0,1 | 0,97 | 15,4 | 19,9 | 1,9 |
| Süd-Ost | -0,2 | 0,98 | 12,9 | 16,9 | 1,2 |
| Ost | -2,6 | 0,98 | 14,4 | 20,4 | 1,8 |

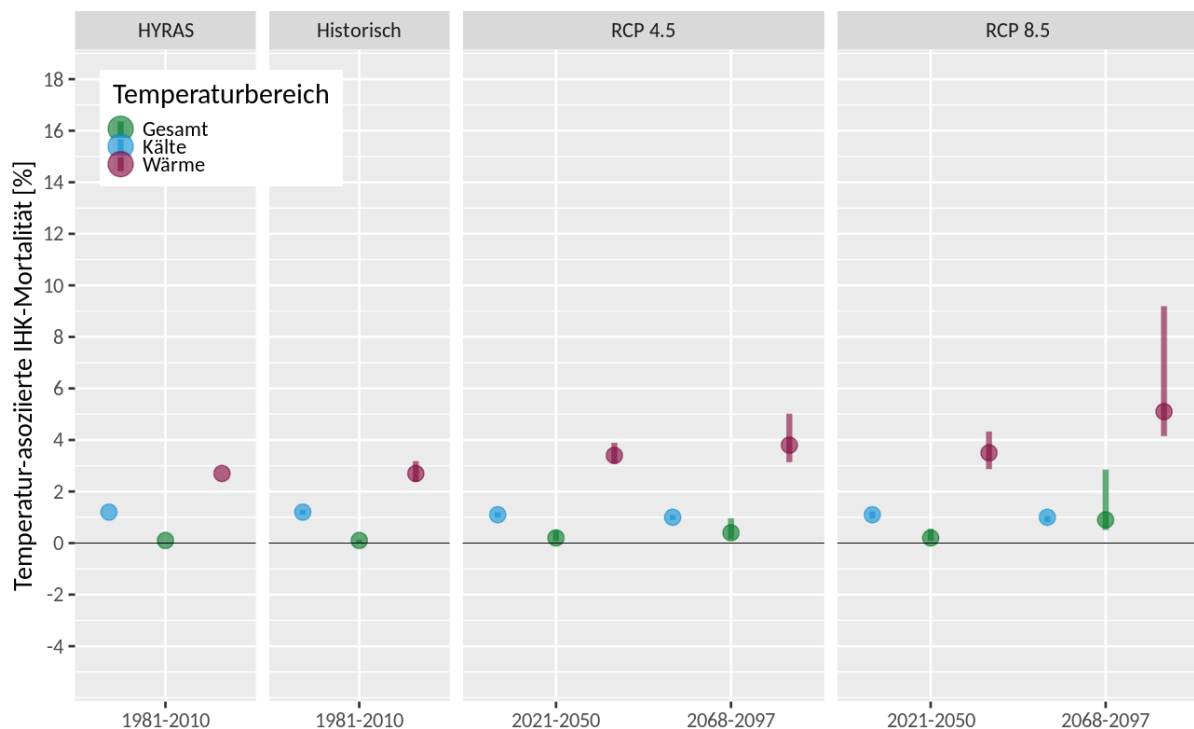
Auch bei den ischämischen Herzkrankheiten kann der Zusammenhang zur thermischen Umwelt mit einer zeitlichen Verzögerung betrachtet werden. Hier zeigt sich aber deutlich, dass an warmen und heißen Tagen das Relative Risiko am selben Tag am höchsten ist und in den darauffolgenden Tagen absinkt. An kalten Tagen kann das Risiko nachfolgender Tage höher sein als das an Tag 0, jedoch zeigt sich der Effekt nicht so deutlich wie bei den chronischen Atemwegserkrankungen.

5.1.2.2 Auswirkungen des Klimawandels

Die TAM aufgrund von IHK zeigt für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 eine ebenfalls nur leicht erhöhte TAM von 0,1 % an (Abbildung 26, Tabelle 16). In den Regionen liegt der Ensemble-Median für den gesamten Temperaturbereich zwischen -0,2 % und 0,3 %, in den Regionen Mitte, Süd-West, Süd-Ost und Ost liegt im Referenzzeitraum damit ein reduziertes Risiko der Mortalität aufgrund der Lufttemperatur vor. Die HYRAS-Daten geben identische oder sehr ähnliche Werte für die TAM aus und bestätigen damit die Aussagen der Ensembles.

Der Anstieg der TAM bis Mitte des Jahrhunderts auf 0,2 % (bezogen auf den Referenzzeitraum des historischen Ensembles) ist in beiden Szenarien nicht signifikant, erst der Anstieg auf 0,9 % gegen Ende des Jahrhunderts im RCP8.5 Szenario ist signifikant (Tabelle 16). Dies gilt ebenfalls für alle der sieben Regionen.

Abbildung 26: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) [%] aufgrund von IHK in Deutschland im Referenzzeitraum 1981 – 2010 (Vergleich HYRAS und Ensemble-Daten) und bis zum Ende des Jahrhunderts für zwei Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Dargestellt als Punkt (HYRAS) bzw. als Ensemble-Median (Punkt) im Wertebereich des Ensembles (vertikaler Balken) für die gesamte Temperaturspanne (grün), den Kältebereich (blau) und Wärmebereich (rot).



Quelle: IHK, ischämische Herzkrankungen, I20 – I25. Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle 16: Temperatur-Assoziierte Mortalität (TAM) [%] aufgrund ischämischer Herzerkrankungen (IHK) im Referenzzeitraum (HYRAS und Ensemble-Daten) sowie die Veränderung für die Zukunftszeiträume bezogen auf den Referenzzeitraum. In fett markiert sind signifikante Änderungssignale.

| Region | Temperaturbereich | 1981 – 2010 HYRAS | 1981 – 2010 Hist. Ensemble | RCP 4.5 2021 – 2050 | RCP 4.5 2068 – 2097 | RCP 8.5 2021 – 2050 | RCP 8.5 2068 – 2097 |
|-------------|-------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Deutschland | Gesamt | 0,1 | 0,1 | + 0,1 | + 0,3 | + 0,1 | + 0,8 |
| | Kälte | 1,2 | 1,2 | - 0,1 | - 0,2 | - 0,1 | - 0,2 |
| | Wärme | 2,7 | 2,7 | + 0,7 | + 1,1 | + 0,8 | + 2,4 |
| Nord | Gesamt | 0,3 | 0,3 | + 0,1 | + 0,2 | + 0,1 | + 0,6 |
| | Kälte | 1,5 | 1,5 | ± 0,0 | ± 0,0 | - 0,1 | ± 0,0 |
| | Wärme | 5,5 | 5,5 | + 0,9 | + 1,3 | + 0,9 | + 2,2 |
| Nord-West | Gesamt | 0,1 | 0,0 | + 0,2 | + 0,3 | + 0,1 | + 0,7 |
| | Kälte | 1,4 | 1,4 | - 0,2 | - 0,3 | - 0,2 | - 0,5 |
| | Wärme | 3,9 | 3,8 | + 0,5 | + 0,8 | + 0,7 | + 1,6 |
| West | Gesamt | 0,0 | 0,0 | + 0,1 | + 0,4 | + 0,1 | + 1,1 |
| | Kälte | 1,3 | 1,2 | - 0,1 | - 0,2 | - 0,1 | - 0,2 |
| | Wärme | 4,1 | 4,0 | + 1,0 | + 1,7 | + 1,2 | + 3,5 |
| Mitte | Gesamt | 0,0 | -0,1 | + 0,2 | + 0,4 | + 0,2 | + 0,9 |
| | Kälte | 1,0 | 1,0 | ± 0,0 | ± 0,0 | ± 0,0 | ± 0,0 |
| | Wärme | 4,1 | 4,1 | + 0,7 | + 1,2 | + 0,8 | + 2,4 |
| Süd-West | Gesamt | -0,1 | -0,2 | + 0,2 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,8 |
| | Kälte | 2,5 | 2,5 | - 0,2 | - 0,2 | - 0,1 | - 0,4 |
| | Wärme | 4,2 | 4,2 | + 0,9 | + 1,5 | + 1,0 | + 2,8 |
| Süd-Ost | Gesamt | 0,0 | -0,1 | + 0,1 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,9 |
| | Kälte | 1,3 | 1,2 | ± 0,0 | - 0,2 | ± 0,0 | - 0,2 |
| | Wärme | 2,6 | 2,6 | + 0,6 | + 0,9 | + 0,6 | + 2,0 |
| Ost | Gesamt | -0,1 | -0,2 | + 0,2 | + 0,3 | + 0,2 | + 0,7 |
| | Kälte | 1,1 | 1,1 | ± 0,0 | ± 0,0 | ± 0,0 | ± 0,0 |
| | Wärme | 5,2 | 5,1 | + 0,8 | + 1,3 | + 0,9 | + 2,3 |

Die Bandbreite der Ensemble-Werte ist bei der TAM aufgrund von IHK geringer als bei der TAM aufgrund von CLRD. Dies kann durch die glattere Kurve des Relativen Risikos aufgrund von IHK über den Temperaturbereich erklärt werden, der ein gewichteter Mittelwert aus 20 Regionen

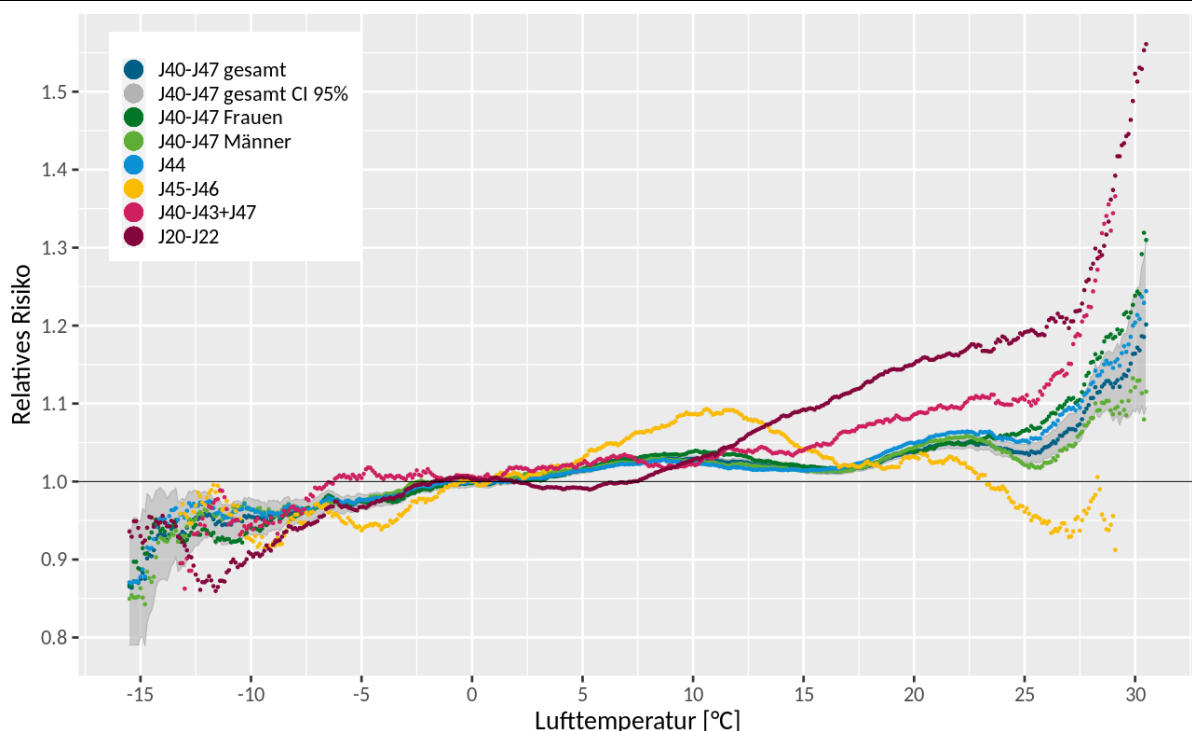
anstelle von sieben Regionen (CLRD) und aus täglichen anstatt 2-tägigen (CLRD) Werten besteht. Wird der Temperaturbereich des Kälteeffekts für die Berechnung der TAM herangezogen, so zeigt das Ensemble für den Referenzzeitraum eine TAM von 1,2 % und eine signifikante Abnahme in den beiden zukünftigen Zeiträumen auf maximal 1,0 %. In den Regionen ist die Veränderung der Kälte-TAM jedoch meist nicht signifikant. Die TAM im hohen Temperaturbereich liegt im Referenzzeitraum bei 2,7 % für Deutschland, regional liegen die Werte zwischen 2,6 % und 5,5 %.

Der Anstieg ist über beide Zeiträume und Szenarien in allen Regionen signifikant. Die Werte steigen auf 3,8 % bis 5,1 % (Deutschland), in den Regionen auf bis zu 7,7 % (Region Nord). Die Änderungssignale bis Mitte und Ende des Jahrhunderts zeigen für beide Szenarien, dass zwar meist eine leichte Abnahme der Kälte-assoziierten IHK-Mortalität zu erwarten ist, dies aber nicht den starken Anstieg der mit warmen und heißen Tagen assoziierten Mortalität kompensieren kann.

5.1.3 Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen

Die Beziehung der Morbidität aufgrund von **chronischen Atemwegserkrankungen** zur thermischen Umwelt ergeben weder als Raten noch als Relatives Risiko einen typischen V- oder U-förmigen Verlauf (Abbildung 27). Die Morbiditätsraten zeigen ein Maximum bei ca. 0 °C, bei extrem kalten und extrem warmen Temperaturwerten sind keine oder nur geringfügigen Anstiege zu erkennen. Die Auswertung der Raten eignet sich aufgrund der Abhängigkeit des Jahres- und Wochenganges nicht gut für Morbiditätsdaten.

Abbildung 27: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen unterteilt in verschiedene ICD-Gruppen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland.



Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; J40 – J47, chronische Erkrankungen der unteren Atemwege; J44, chronische obstruktive Lungenkrankheit (COPD); J45 – J46, Asthma bronchiale und Status astmaticus; J40, Bronchitis; J43, Emphysem; J47, Bronchiektasen; J20 – J22, akute Bronchitis, Bronchiolitis und weitere akute Infektionen der unteren Atemwege. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Der Zusammenhang zwischen dem Relativen Risiko der Krankenhausaufnahmen und der thermischen Umwelt zeigt einen anderen Verlauf als bei den Sterbefällen (Abbildung 27). Im Mittel über alle Regionen haben die Diagnosegruppen J40 – J47-Gesamt (beide Geschlechter), Frauen, Männern und J44 (COPD) einen sehr ähnlichen Verlauf. Das Relative Risiko steigt fast kontinuierlich mit zunehmender Lufttemperatur an. Bei tiefen Temperaturwerten liegt das RR noch unterhalb des Erwartungswertes, ab ca. 5 °C erreicht das RR Werte über eins, ab ca. 17 °C steigt es deutlich über den Erwartungswert und erreicht das Maximum bei extremer Hitze. Bei Tagesmittelwerten von 20 – 25 °C ist das Relative Risiko von J40 – J47 Gesamt um 4 – 5 % erhöht, bei 28 °C Tagesmittelwert ist das RR bereits um 10 % erhöht, diese Lufttemperaturwerte kommen als Tagesmittelwert jedoch nur selten vor. Das RR der Cluster-Diagnose J40 – J43 + J47 (chron. Bronchitis, Emphysem, Bronchiektasen) steigt stärker und kontinuierlich mit zunehmender Lufttemperatur an, oberhalb von ca. 26 °C ist das RR um bis zu 40 % erhöht. Der deutlichste Anstieg des Relativen Risikos mit höheren Temperaturwerten zeigt die Diagnose-Gruppe J20 – J22 (akute Infektionen der unteren Atemwege). Ab 10 °C steigt die Kurve linear an, bei Temperaturwerten über ca. 26 °C nimmt die Steigung stark zu. Das maximale RR an den sehr seltenen extrem heißen Tagen beträgt ca. 1,55.

Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma bronchiale (J45 – J46) zeigen einen anderen Verlauf (Abbildung 27). Das Relative Risiko weist zwar auch einen Anstieg mit zunehmender Temperatur auf, erreicht das Maximum mit einem Anstieg der Morbidität um 9 % jedoch bei ca. 11 °C. Oberhalb von 24 °C liegt es sogar unter dem Erwartungswert. Dieser fast gegensätzliche Verlauf konnte auch im Jahresgang der Morbiditätsrate und des Erwartungswertes gefunden werden, wo ein Anstieg im Frühling und Herbst zu erkennen ist mit einem absoluten Minimum im Sommer und lokalem Minimum im Winter (Abbildung A 3). Einerseits können die Erkenntnisse vieler anderer Studien zu Atemwegserkrankungen, die bei Asthma bronchiale zwei lokale Maxima in Frühling und Herbst feststellten, bestätigt werden (siehe Kapitel 2.2). Andererseits muss bei der Interpretation des Relativen Risikos von Asthma bronchiale beachtet werden, dass aufgrund des abweichenden Jahresverlaufes, der Gaußfilter den Erwartungswert der Morbiditätsrate im Vergleich zur Gesamtgruppe J40 – J47 nur unzureichend darstellen kann (Abbildung A 2, Abbildung A 3).

Da die Krankenhausaufnahmen aufgrund von Atemwegserkrankungen keinen U- oder V-förmigen Verlauf zeigen, können auch keine unteren und oberen Schwellenwerte analog zu den Mortalitätsdaten bestimmt werden. Der Temperaturwert, ab dem RR signifikant über eins steigt, kann als Schwellenwert zwischen dem risikoarmen und dem risikobelasteten Bereich betrachtet werden, aber aufgrund seiner Lage bei unter 10 °C nicht als Schwelle zum Hitze-Effekt (Tabelle 17). Dieser Schwellenwert liegt bei den meisten Diagnosegruppen in den Regionen West und Süd-West am höchsten, Region Nord hat meist den geringsten Schwellenwert. Die Steigungen von RR oberhalb des Schwellenwertes in den einzelnen Regionen unterscheiden sich kaum, der Temperaturbereich ist aufgrund der geringeren Fallzahlen aber deutlich eingeschränkt. Daher werden hier nur die Werte für den Deutschlandmittelwert angegeben.

Das Relative Risiko steigt in der Gesamtgruppe J40 – J47 um ca. 0,3 % pro °C Lufttemperatur. In der weiblichen Bevölkerung beträgt die Steigung 0,5 % pro °C, ebenso wie bei den COPD-Erkrankten. Die stärkste Steigung haben die akuten Infektionen der unteren Atemwege (J20 – J22), was durch die hohen RR-Werte an extrem heißen Tagen bedingt ist. Krankenhausaufnahmen mit Asthma haben keine signifikante Steigung.

Tabelle 17: Schwellenwerte (SW, Tagesmittelwert der Lufttemperatur in °C) des Relativen Risikos der Morbidität von Atemwegserkrankungen, ab dem das RR signifikant über eins steigt und Steigungen (St) von RR oberhalb des Schwellenwertes für den Deutschlandmittelwert der Diagnosegruppen.

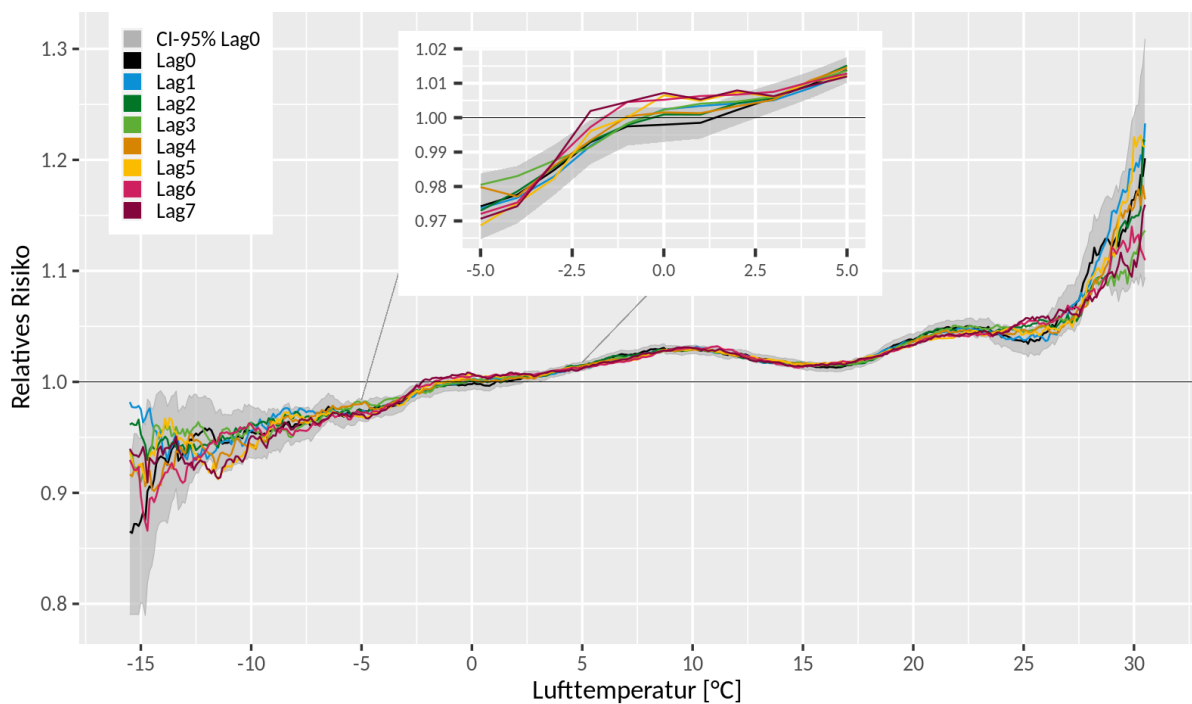
| ICD | Deutschland | | Nord | Nord-West | West | Mitte | Süd-West | Süd-Ost | Ost |
|------------------|-------------|-----------|------|-----------|------|-------|----------|---------|------|
| | SW | St [%/°C] | SW | SW | SW | SW | SW | SW | SW |
| J40 – J47 Gesamt | 2,4 | 0,3 | -1,0 | 1,8 | 5,1 | 4,2 | 6,6 | 3,2 | 1,5 |
| J40 – J47 Frauen | 3,4 | 0,5 | -1,1 | 1,8 | 5,8 | 4,5 | 5,4 | 3,6 | 4,1 |
| J40 – J47 Männer | 1,8 | 0,2 | -0,8 | 2,3 | 4,9 | 3,8 | 6,7 | -3,4 | 1,4 |
| J44 | 2,4 | 0,5 | -1,0 | 2,2 | 5,3 | 4,1 | 5,6 | -4,4 | 4,0 |
| J45 – J46 | 1,3 | -0,3 | 3,3 | 1,7 | 5,0 | 3,5 | 7,0 | 3,2 | -0,6 |
| J40 – J43 + J47 | (-2) 1,5* | 0,7 | -1,0 | 2,0 | 4,8 | -0,7 | -4,7 | 3,6 | 2,2 |
| J20 – J22 | (-0,5) 7,9* | 1,5 | -1,1 | 11,7 | 10,9 | 8,9 | 8,3 | 7,5 | 8,5 |

* Bei diesen ICD-Diagnosen ergibt sich bereits ein früherer signifikanter Anstieg von RR über eins (in Klammern), sinkt vor dem endgültigen Schwellenwert aber nochmals unter den Erwartungswert.

Der Effekt der thermischen Umwelt auf die Morbidität kann auch zeitlich verzögert eintreten, was vor allem im niedrigen Temperaturbereich zu beachten ist (Lag-Effekt). Die Analyse der zeitlich verzögerten Reaktion der Morbidität von Atemwegserkrankungen zeigt jedoch nur geringe Unterschiede zwischen Lag 0 (selber Tag) bis zu Lag 7, was den Zusammenhang der Morbidität mit dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur sieben Tage vorher beschreibt (Abbildung 28). Im mittleren Temperaturbereich ist nahezu keine differenzierte Interpretation der Kurven möglich. An Tagen mit einem niedrigen Tagesmittelwert zeigt sich, dass mit einer zeitlichen Verzögerung ein höheres Relatives Risiko einhergeht. An extrem kalten Tagen weist vor allem eine Verzögerung von mindestens drei Tagen ein erhöhtes Relatives Risiko im Vergleich zu Tag 0 auf, die Morbidität liegt jedoch immer noch unterhalb des Erwartungswertes. An warmen Tagen mit Lufttemperaturtagesmittelwerten von ca. 25 °C liegen die Kurven mit einer zeitlichen Verzögerung ebenfalls über der Kurve ohne Verzögerung, d. h., das Relative Risiko steigt mit einer Verzögerung von 6 Tagen um 5 %. An heißen Tagen steigt außerdem das Risiko am selben Tag wieder stark an und liegt zusammen mit Lag 1 über den anderen Kurven. Warum auch Lag 7 an warmen und heißen Tagen ein so hohes Risiko aufweist ist unklar. Auch hier muss wieder beachtet werden, dass die Unsicherheit an den extrem kalten und heißen Tagen größer wird und die Unterschiede zwischen den Lags größtenteils überdeckt.

Generell sind die Zusammenhänge zwischen der Tagesmitteltemperatur und der Morbidität weniger gut interpretierbar als die Zusammenhänge mit der Mortalität. Ein Grund dafür könnte der ausgeprägte Wochengang sein, der nicht witterungsbedingt ist und alle anderen Effekte überlagert (Abbildung 29). Dieser kann vom Erwartungswert nur unzureichend abgebildet werden. Der Einfluss von Feiertagen ist ebenfalls vorhanden. Zusätzlich sind bei den Morbiditätsdaten Fälle miteinbezogen, die geplante Termine darstellen und keine Notfälle sind, daher auch keine Wetterabhängigkeit aufweisen können. Die angewandte Methode ist damit nicht so gut für die Auswertung von Morbiditätsdaten geeignet. Aufgrund dessen wurde auf eine Analyse eines möglichen Effekts des Klimawandels auf diese Morbiditätsdaten verzichtet.

Abbildung 28: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität von chronischen unteren Atemwegserkrankungen (J40 – J47) für zeitliche Verschiebungen von 0 bis 7 Tagen für die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland.



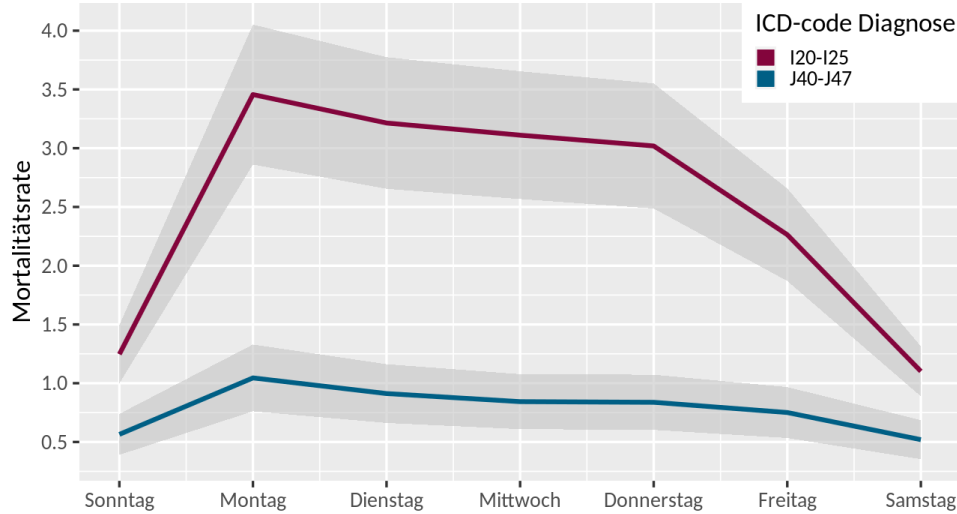
Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

5.1.4 Morbidität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen

Die Morbiditätsdaten zu **ischämischen Herzerkrankungen** zeigen einen sehr starken Wochengang (Abbildung 29), dessen Spanne zwischen dem Minimum am Wochenende und dem Maximum am Montag noch stärker ausgeprägt ist, als bei den Atemwegserkrankungen. Die Fallzahlen bleiben bis Donnerstag recht hoch und fallen dann stark ab. Diese starken Schwankungen führen dazu, dass eine Übersichtsgrafik für die Morbiditätsdaten nicht gut auszuwerten ist. Die Anzahl der Krankenhausaufnahmen mit ischämischen Herzerkrankungen reagiert ebenfalls sehr stark auf gesetzliche Feiertage wie Neujahr, 1. Mai (60. Tag des Jahres), dem Tag der Deutschen Einheit (276. Tag des Jahres), dem 31. Oktober bzw. 1. November (304 bzw. 305. Tag) und den Weihnachtstagen (Abbildung 30). Ein Grund für den starken Wochengang und die Abhängigkeit von Feiertagen könnte eine erhöhte Anzahl an geplanten Krankenhausaufenthalten aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen sein, die den Effekt von Krankenhauskontakten aufgrund von akuten Symptomen überlagert.

Die Auswertung der Morbidität von ischämischen Herzerkrankungen im Zusammenhang mit der thermischen Umwelt zeigt ein schwer interpretierbares Bild, mit dem keine Aussage über einen Zusammenhang der Morbidität mit der thermischen Umwelt getroffen werden kann (Abbildung 31). In der Literatur ist der Zusammenhang zwischen der thermischen Umwelt und der ischämischen Morbidität zwar auch seltener belegt worden als für die Mortalität, dennoch gibt es zahlreiche Untersuchungen, die einen Zusammenhang bestätigen konnten. Die schwach ausgeprägten Ergebnisse sind eine Bestätigung der Ergebnisse der Vorläuferstudie, die bei der Auswertung der Morbiditätsdaten mit der angewandten Methodik ebenfalls auf diese Schwierigkeiten stieß (Koppe et al. 2013a).

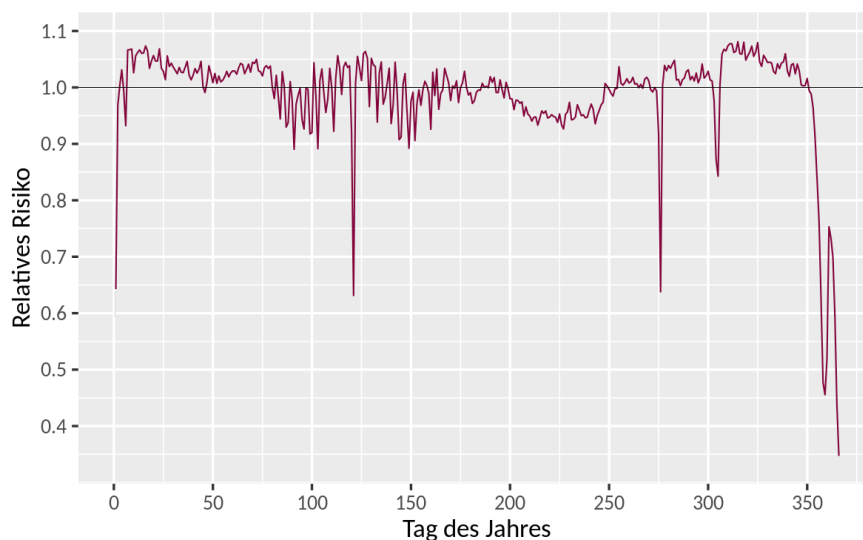
Abbildung 29: Gemittelter Wochengang der Morbiditätsrate von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) im Vergleich zum Wochengang der Morbiditätsrate aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschland.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

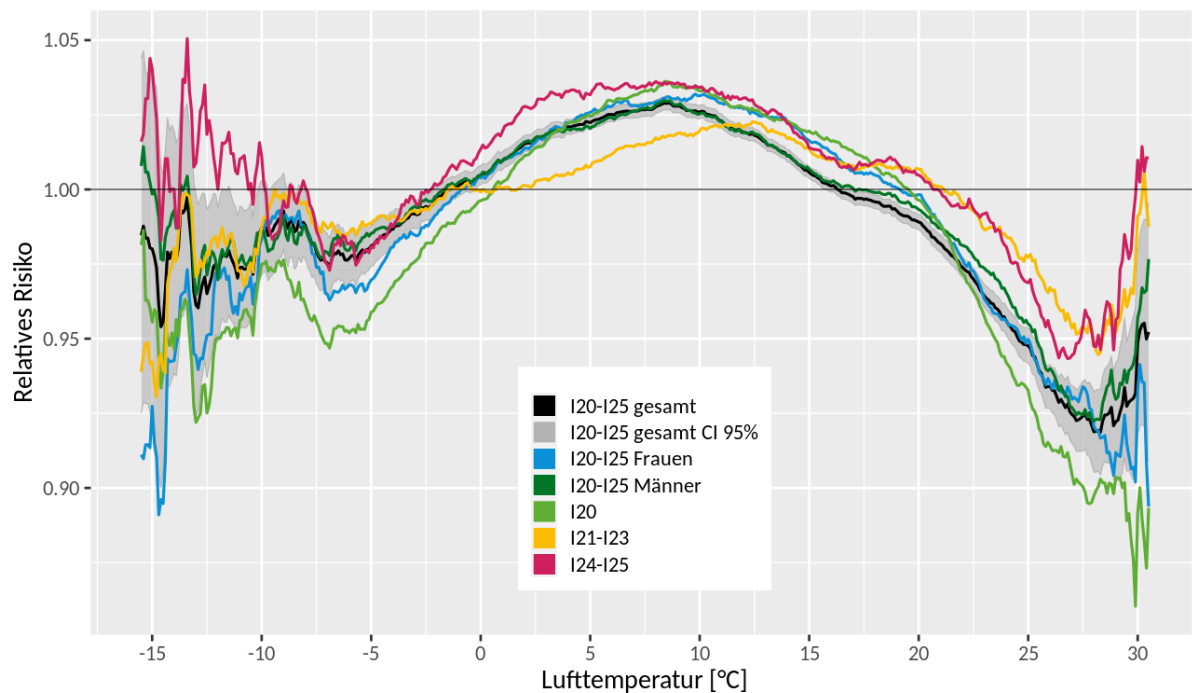
Die größere Datengrundlage hat die Problematik des starken Wochenganges und der angenommenen großen Anzahl an geplanten Terminen nicht signifikant verbessert. Die Berücksichtigung einer zeitlichen Verzögerung der Morbidität um bis zu sieben Tage im Vergleich zum Lufttemperatur-Tagesmittelwert führt ebenfalls zu keiner Verbesserung des Bildes. Das ansteigende Relative Risiko im extrem kalten und heißen Bereich der Lufttemperatur deutet jedoch auf eine Reaktion der Krankenhausaufnahmen während Kältephasen und Hitzeperioden hin. Aufgrund der nicht belastbaren Ergebnisse wurde auf eine Auswertung dieser Morbiditätsdaten im Zusammenhang mit dem Klimawandel verzichtet.

Abbildung 30: Jahrgang des Relativen Risikos von Krankenhausaufnahmen mit ischämischen Herzerkrankungen inklusive Feiertage in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschlands.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 31: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen unterteilt in verschiedene ICD-Gruppen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland.



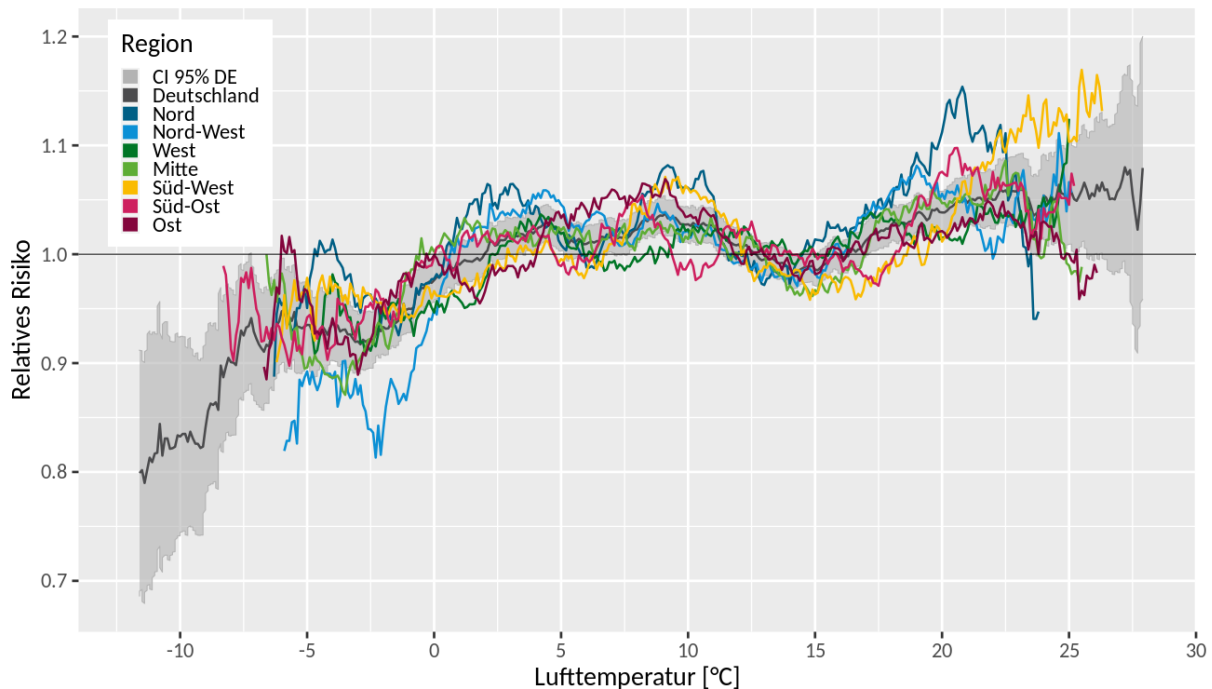
Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; I20 – I25, ischämische Herzerkrankungen; I20, Angina Pectoris; I21 – I23, akuter und rezidivierender Myokardinfarkt inkl. Komplikationen danach; I24 – I25, sonstige und chronische ischämische Herzkrankheit. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

5.1.5 Mortalität durch Suizid

Die Daten zu Suizidfällen (X60 – X84) in Deutschland zeigen eine Zweitagesrate von ca. 0,07 Fällen, welche in den sieben Großregionen relativ gleichmäßig verteilt ist und keinen Trend über die Jahre 2001 bis 2015 zeigt. Im Datensatz der Suizide wurde, im Vergleich zu atemwegs- oder ischämisch-bedingten Sterbefällen, ein leichter Wochengang und auch ein Einfluss von Feiertagen gefunden. Der Jahresgang zeigt übereinstimmend mit den Literaturergebnissen ein Maximum im Frühling und Frühsommer. Ab August nimmt die Rate zuerst langsam dann rasch ab bis zu einem Minimum im Winter. Ausnahme davon sind hohe Fallzahlen Anfang Januar. Dies wird in vielen anderen Ländern ebenfalls beobachtet und ist vermutlich durch das Ende der Weihnachtsfeiertage und Neujahr bedingt (siehe Kapitel 2.3 und z. B. Page et al. (2007)).

Weder die Suizidrate noch das Relative Risiko zeigen einen V- oder U-förmigen Zusammenhang mit der Lufttemperatur (Abbildung 32). Bei Zweitagesmittelwerten der Lufttemperatur von unter 0 °C ist das Relative Risiko eines Suizides sehr gering, in den meisten Regionen weit unterhalb des Erwartungswertes. Danach steigt das RR wellenförmig an, das erste Maximum liegt bei ca. 4 °C, das zweite bei ca. 11 °C dann folgt ein lokales Minimum bei 15 °C. An wärmeren Tagen ($T_a > 15$ °C) steigt das RR stark an und erreicht das Maximum bei ca. 27 °C, das RR weist aber in diesen Extrembereich der Temperatur ein sehr hohes Konfidenzintervall auf. An diesen Tagen ist das Risiko eines Suizides um maximal 10 % bis 15 % erhöht. Das höchste Risiko an heißen Tagen zeigt die Region Süd-West, die an Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur größer 25 °C ein RR von bis zu 1,15 aufweist. Ausnahme von dem beschriebenen Verlauf des RR ist Region Ost, deren RR das absolute Maximum bereits bei 9,1 °C erreicht und bei ca. 22 °C ein lokales Maximum aufweist.

Abbildung 32: Zusammenhang zwischen dem Zweitagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko von Suiziden der Jahre 2001 – 2015 für sieben Großregionen und den Deutschlandmittelwert.



Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; DE, Deutschlandmittelwert. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Die Region Nord-West weist das geringste RR im kalten Temperaturbereich auf mit Werten von ca. 0,83 bei ca. -6 °C. Dagegen zeigen die Regionen Nord und Ost bereits leicht erhöhte Risiken (RR > 1) in diesem Temperaturbereich auf. Oberhalb vom Maximum des RR der Region Nord bei ca. 21 °C sinkt RR stark mit weiter steigenden Temperaturwerten, die Gründe dafür sind unklar.

Der Anstieg von Suiziden im Frühling und Frühsommer wird in der Literatur neben der Lufttemperatur auch mit der zunehmenden Sonnenscheindauer, Tageslänge oder Solarstrahlung in Zusammenhang gebracht (siehe Kapitel 2.3.2). Daher wurde dieser Zusammenhang hier auch geprüft (Abbildung A 4). Es ist ein leichter Anstieg des Suizidrisikos mit zunehmender Sonnenscheindauer zu erkennen; das erste, meist lokale Maximum liegt bei 13 - 15 Stunden als Zweitagesumme, das zweite Maximum oberhalb eines Wertes von ca. 21 Stunden. Allerdings gibt es in den Regionen große Schwankungen des Relativen Risikos, besonders die Region Nord fällt mit einem stark erhöhten RR bei hohen Sonnenscheindauern auf, so dass eine einheitliche Aussage schwierig ist. Aufgrund der wenig belastbaren Ergebnisse wurde auf eine Auswertung der Suizide im Zusammenhang mit dem Klimawandel verzichtet.

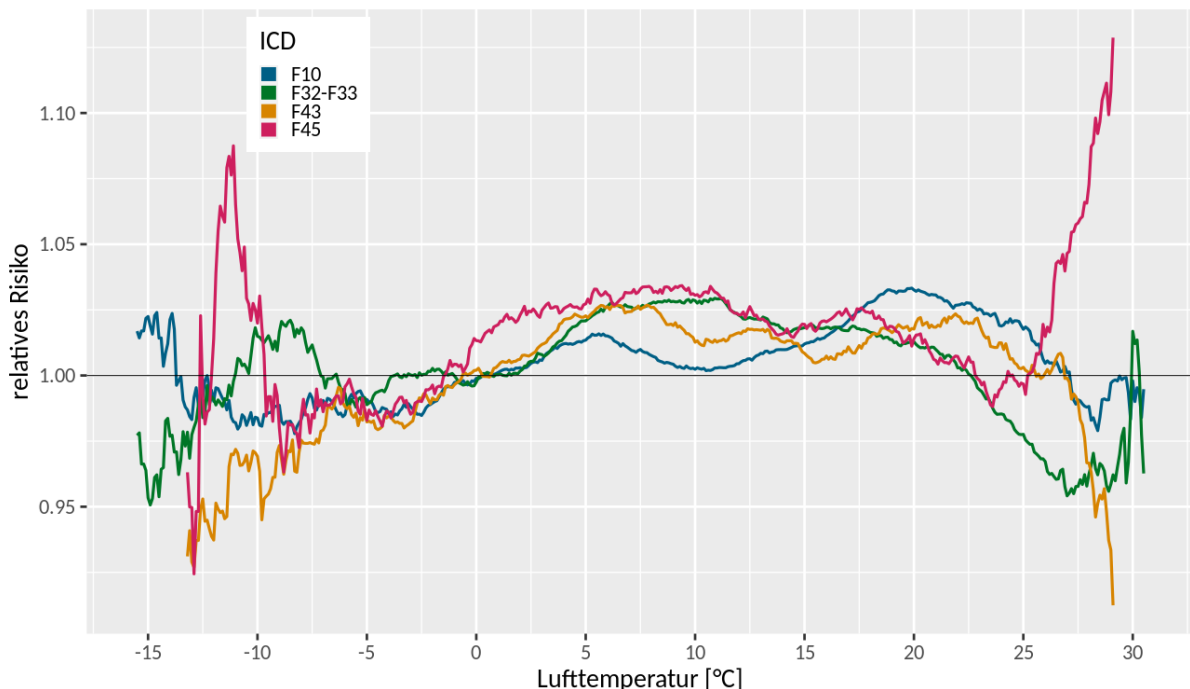
5.1.6 Morbidität aufgrund von psychischen und Verhaltensstörungen

Morbiditätsdaten liegen für die ICD-Diagnosen F10 (**Psychische und Verhaltensstörungen durch Alkohol**), F32 – F33 (**Depressive Störungen**), F43 (**Reaktionen auf Belastungs- und Anpassungsstörungen**) und F45 (**Somatoforme Störungen**) vor. F10-Diagnosen werden in Deutschland im Durchschnitt 1,06-mal pro Tag und pro 100 000 Personen gestellt, Depressive Störungen (F32 – F33) dagegen haben eine mittlere Rate von 0,68. Reaktionen auf Belastungs- und Anpassungsstörungen (F43) werden durchschnittlich nur 0,23-mal pro Tag und 100 000 Personen gestellt, somatoforme Störungen (F45) haben eine sehr geringe mittlere Rate von 0,12.

Auch bei diesen Diagnosedaten sind ein Wochengang (Maximum am Anfang der Woche, Minimum am Wochenende) und Reaktionen auf Feiertage (mit geringeren Fallzahlen) zu erkennen. Bei den F10-Diagnosen ist zudem ein starker Monatsgang mit einem Maximum am Anfang des Monats zu finden, der den Wochengang deutlich überlagert und vermutlich durch die Verfügbarkeit von finanziellen Mitteln für Alkohol Anfang des Monats bedingt ist. Der Monatsgang konnte bei der Berechnung des Erwartungswertes nicht berücksichtigt werden.

Der Zusammenhang zwischen F10-Diagnosen und der Lufttemperatur zeigt bei sehr kalten Temperaturwerten ($T_a < -12^\circ\text{C}$) ein erhöhtes RR, welches dann zwischen ca. -12°C und ca. 0°C unterhalb des Erwartungswertes liegt (Abbildung 33). Im positiven Temperaturbereich steigt RR in Wellen an und erreicht das Maximum bei 20°C mit einem RR-Wert von ca. 1.03, was eine geringe Abweichung vom Erwartungswert darstellt. Bei Temperaturwerten oberhalb von 20°C sinkt RR wieder und fällt an sehr heißen Tagen über 25°C wieder unter den Erwartungswert. Der Verlauf des RR von depressiven Störungen (F32 – F33) weist zwischen Tagen mit einer Lufttemperatur von -2°C und 27°C fast durchgehend positive Abweichungen vom Erwartungswert auf ($\text{RR} > 1$). In den Extrembereichen der Lufttemperatur liegt RR unterhalb des Erwartungswertes, außer bei ca. 30°C , wo sich eine Spitze des RR über den Erwartungswert hebt. Ein sehr ähnlicher Verlauf zeigt sich bei den F43-Diagnosen, wo ein erhöhtes RR zwischen ca. 1°C und 27°C gefunden wurde. Deutlich zu erkennen sind die hohen RR-Werte von somatoformen Störungen (F45) an extrem kalten und heißen Tagen. Dazwischen liegt RR nur in wenigen Bereichen unterhalb des Erwartungswertes (Abbildung 33).

Abbildung 33: Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur und dem Relativen Risiko der Morbidität aufgrund von verschiedenen psychischen und Verhaltensstörungen in den Jahren 2001 - 2015 in Deutschland.



Erläuterungen: F10, Psychische und Verhaltensstörungen durch Alkohol; F32 – F33, Depressive Episoden und rezidivierende depressive Störung; F43, Reaktionen auf schwere Belastungen und Anpassungsstörungen; F45, Somatoforme Störungen.
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

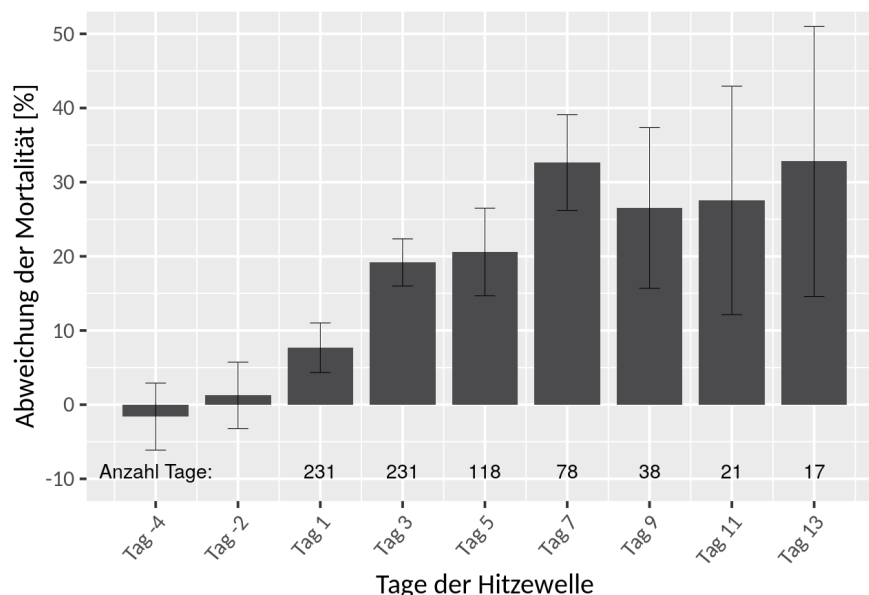
Der Zusammenhang zwischen der Morbidität dieser vier Diagnosen und der Lufttemperatur ist nicht eindeutig interpretierbar, da scheinbar hauptsächlich Tage im mittleren Temperaturbereich ein erhöhtes Risiko aufweisen. Allerdings bewegen sich die Werte der RR in einem schmalen Bereich um den Erwartungswert herum mit einer maximalen Abweichung der Morbiditätsrate von 10 %. Damit ist der Einfluss der Lufttemperatur auf diese Morbiditätsdaten gering. Aufgrund der Funktion der Krankenhausaufnahmen aufgrund von psychischen und Verhaltensstörungen als Kontrollgröße im Vergleich zu den Morbiditätsdaten der chronischen Atemwegserkrankungen wurde kein signifikanter Zusammenhang mit der Lufttemperatur erwartet. Aufgrund dessen wurde auf eine prospektive Analyse dieser Morbiditätsdaten in Bezug auf des Klimawandels verzichtet.

5.2 Hitzeperioden

5.2.1 Retrospektive Analyse der Mortalität

Die Mortalität aufgrund von **chronischen unteren Atemwegserkrankungen** liegt während einer Hitzewelle um durchschnittlich 18,1 % höher als der Erwartungswert (Abbildung 34). Die Mortalität steigt stark innerhalb der ersten Tage an und erreicht, wenn die Hitzewelle so lange andauert, ein Maximum am siebten und achten Tag von ca. 33 % erhöhter Mortalität im Vergleich zum Erwartungswert. Bei noch länger andauernden Hitzewellen bleibt das Niveau bis zu den Tagen 13/14 hoch. Regional kann die mittlere Änderung der Mortalität während einer Hitzewelle bis zu 21,8 % (Region Mitte), oder aber nur 13,8 % betragen (Regionen Süd-Ost und Ost) (Tabelle 18).

Abbildung 34: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland.

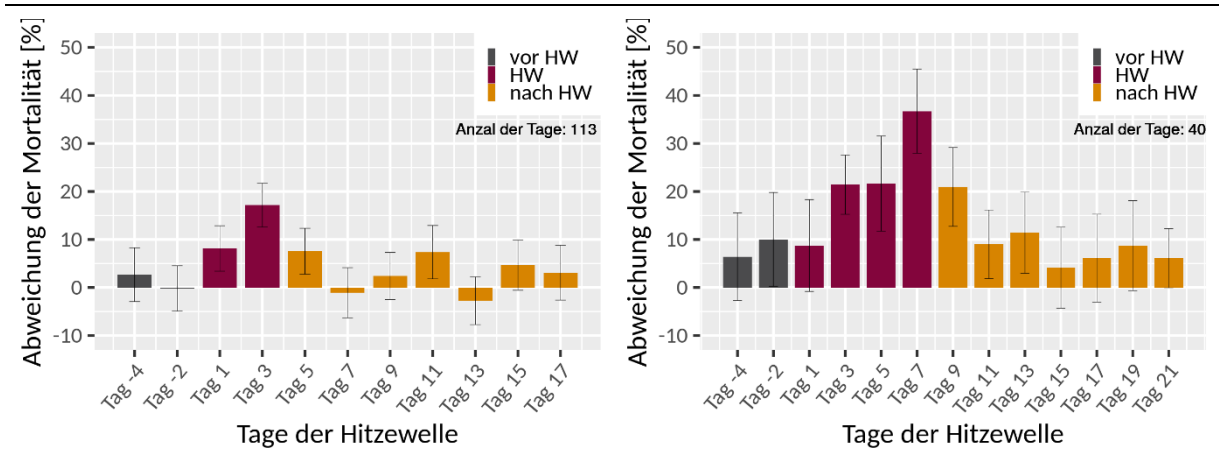


Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Die Betrachtung der Tage nach einer 4-tägigen (bzw. zwei doppeltägigen) Hitzewelle (Abbildung 35 links) zeigt, dass die ersten beiden Tage nach der Hitzewelle ebenfalls noch eine deutlich erhöhte Mortalität aufweisen, die ungefähr mit den Auswirkungen an Tag 1 und Tag 2 vergleichbar sind. Die weiteren neun Tage danach (Tag 7 – Tag 15) schwanken meist wieder um den Erwartungswert. In den Jahren 2001 – 2015 traten in den sieben Großregionen 113 Hitzewellen

mit der Länge von vier Tagen auf (mit der Definition für Zweitagesmittelwerte der Lufttemperatur). Bei Hitzewellen, die acht Tage lang anhielten (vier Zweitagesmittelwerte) sind die Auswirkungen nach der Hitzewelle noch deutlicher zu erkennen (Abbildung 35 rechts). Weitere sechs Tage (drei Zweitagesmittelwerte) nach dem Ende der Hitzewelle weisen im Mittel eine signifikante Abweichung der Mortalität auf.

Abbildung 35: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) im Verlauf von 4-tägigen (links) bzw. 8-tägigen Hitzewellen (rechts) mit Tagen vor, während und nach den Hitzewellen.



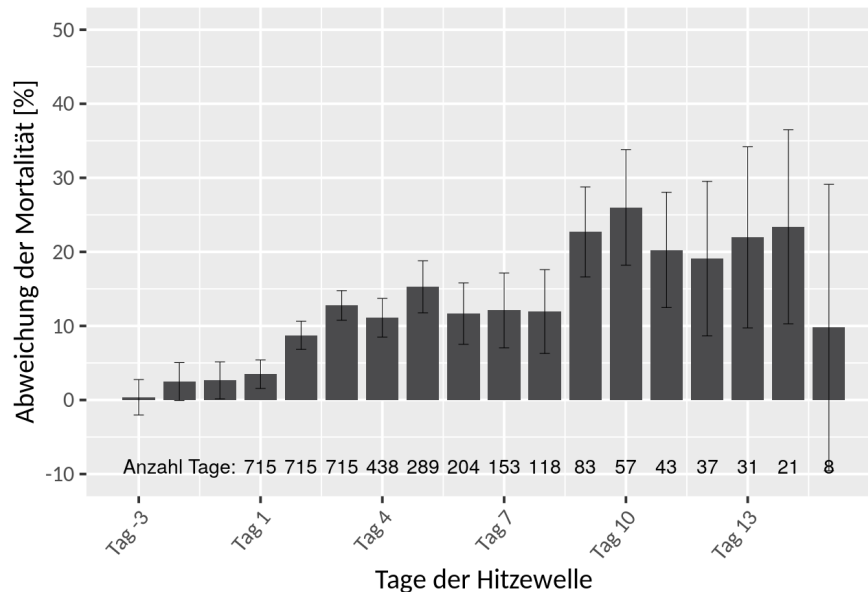
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle 18: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen unteren Atemwegserkrankungen (J40 – J47), ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) und Suiziden (X60 – X84) während Hitzewellen (gemittelt über die Hitzewellentage) im Zeitraum 2001 – 2015 in Deutschland.

| Region | Änderung der Mortalität [%] J40 – J47 | Änderung der Mortalität [%] I20 – I25 | Änderung der Mortalität [%] X60 – X84 |
|-------------|--|--|--|
| Deutschland | 18,1 | 10,8 | 6,4 |
| Nord | 19,2 | 6,9 | 8,5 |
| Nord-West | 18,1 | 8,9 | 2,1 |
| West | 19,6 | 12,1 | 7,6 |
| Mitte | 21,8 | 10,8 | 5,2 |
| Süd-West | 19,6 | 10,1 | 11,1 |
| Süd-Ost | 13,8 | 7,0 | 7,5 |
| Ost | 13,8 | 11,7 | 3,8 |

Die Mortalität aufgrund von **ischämischen Herzerkrankungen** ist während Hitzewellen etwas weniger stark erhöht, im Durchschnitt um 10,8 % (Abbildung 36, Tabelle 18). Regional liegt die Abweichung zwischen ca. 7 % (Regionen Nord und Süd-Ost) und 12,1 % in der Region West. Die Abweichung der Mortalität steigt, je länger eine Hitzewelle andauert und erreicht ein Maximum von 26 % am zehnten Tag der Hitzewelle.

Abbildung 36: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) während Hitzewellen gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

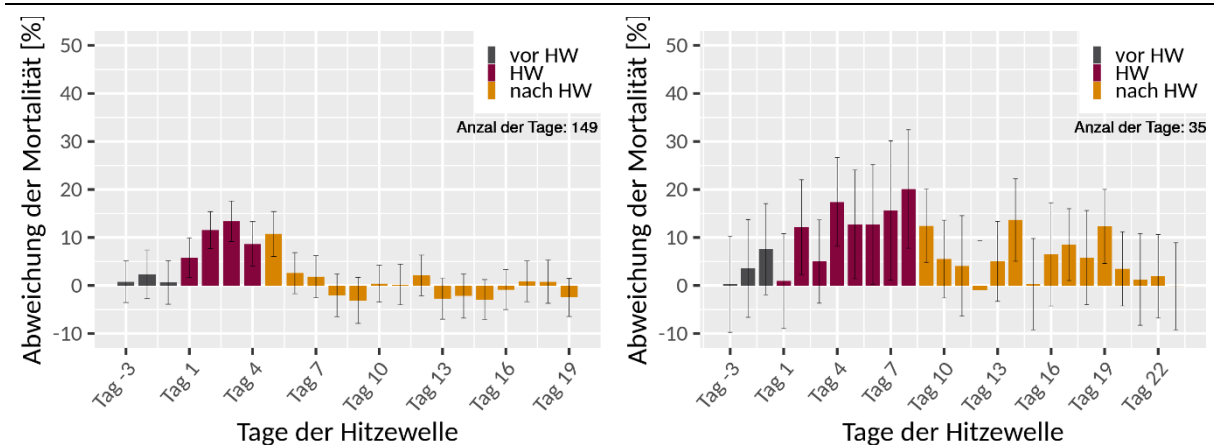
Die Regionen Nord, Nord-West und Süd-Ost zeigen einen geringeren Hitze-Effekt als die Regionen West, Mitte und Ost mit den jeweils höchsten Werten. Die mittlere Änderung der Mortalität während Hitzewellen liegt in der weiblichen Bevölkerung mit 13,7 % höher als in der männlichen Bevölkerung (9,1 %) (Tabelle A 10). Bei den Frauen tritt das Maximum am zehnten Tag mit 36,8 % auf, bei Männern am neunten Tag mit 22,5 %. Die Untergruppe der ischämischen Herzerkrankungen I20 – I22 (Angina Pectoris und Myokardinfarkt) weist eine geringere Abweichung der Mortalität bei Hitze auf als die Gesamtgruppe. Ausgeglichen wird dies durch die starke Hitzebelastung in der Gruppe der sonstigen ischämischen Herzerkrankungen (I24 – I25). Vor allem im Westen Deutschlands ist die Mortalität während Hitzewellen hoch, ebenso wie in den Regionen Mitte, Süd-West und Ost.

Der Verlauf von 4-tägigen Hitzewellen zeigt auch bei den ischämischen Herzerkrankungen, dass der erste Tag nach der Hitzewelle ein deutlich erhöhtes Risiko aufweist (Abbildung 37 links). Die Mortalität an den weiteren 13 Tagen schwankt nahe um den Erwartungswert und ist teilweise negativ. Betrachtet man Hitzewellen mit einer Länge von acht Tagen, zeigt sich ein neues Maximum von ca. 20 % am achten Tag (Abbildung 37 rechts). Der Anstieg verläuft sehr steil und liegt bereits am zweiten Tag über 10 %. Der erste Tag am Ende der Hitzewelle weist ebenfalls noch eine erhöhte Mortalität von ca. 12 % auf, in den folgenden 13 Tagen liegt der Mittelwert fast durchweg im positiven Bereich, das 95 %-Konfidenzintervall beinhaltet jedoch oft auch negative Werte. Der Vergleich der beiden Todesursachen zeigt hier eine stärkere Betroffenheit der Mortalität aufgrund von chronischen unteren Atemwegserkrankungen als aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen.

Die Analyse der **Suizide** in Deutschland während Hitzewellen zeigt eine mäßige Erhöhung der Mortalität um durchschnittlich 6,4 % pro Tag der Hitzewelle (Tabelle 18), das Maximum liegt bei ca. 15,4 % am neunten und zehnten Tag der Hitzewelle. Das 95 %-Konfidenzintervall weist aber immer wieder auch negative Werte auf, der Effekt der Hitzebelastung auf Suizide ist demnach nicht aussagekräftig. Regional betrachtet, liegt die Abweichung der Mortalität bei Hitze in den

Regionen Nord und Süd-West am höchsten, im Nord-Westen und Osten Deutschlands ist das Risiko geringer (Tabelle 18). Eine Betrachtung von Hitzewellen mit festgelegter Länge und dem Verlauf der Mortalität vor, während und nach der Hitzewelle zeigt ebenfalls keine dauerhaft positive Abweichung der Mortalität.

Abbildung 37: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (I20 – I25) im Verlauf von 4-tägigen (links) bzw. 8-tägigen Hitzewellen (rechts) mit Tagen vor, während und nach den Hitzewellen.



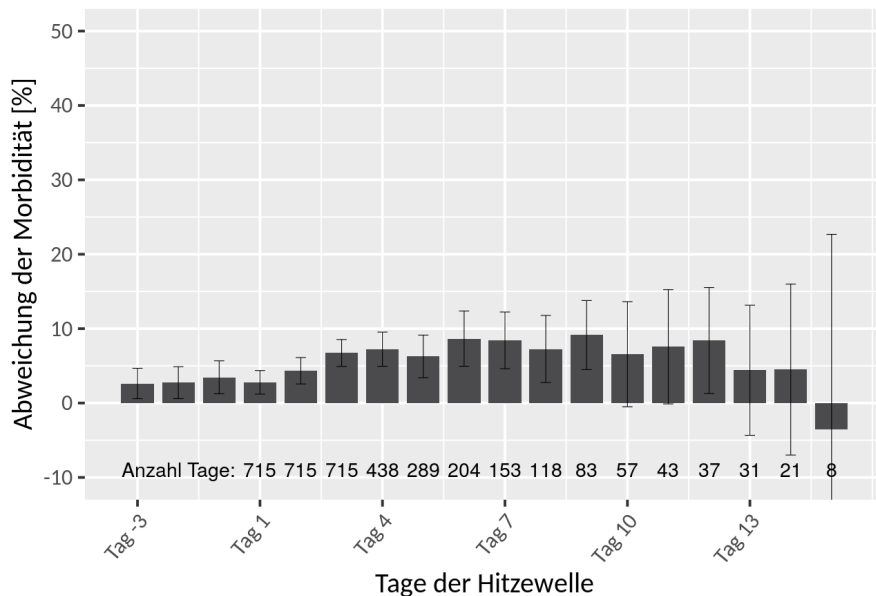
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

5.2.2 Retrospektive Analyse der Morbidität

Die Krankenhausaufnahmen aufgrund von **Atemwegsbeschwerden** zeigen ebenfalls eine deutliche Reaktion auf Hitzewellen, mit einem um durchschnittlich 5,8 % erhöhten Relativen Risiko liegt die Abweichung aber nur bei etwas mehr als der Hälfte des Mortalitätsanstiegs (Abbildung 38, Tabelle 19). Die Zunahme erfolgt etwas langsamer als bei den Sterbefällen, Werte von maximal 8 – 9 % Abweichung der Morbidität werden an den Tagen 6 – 9 erreicht (Gesamte Diagnosegruppe J40 – J47). Dies ist analog zum Anstieg der Mortalität mit dem Maximum ebenfalls am 7. Tag. Die Morbidität ab dem 10. Tag ist nicht mehr so deutlich erhöht, das 95 %-Konfidenzintervall enthält teilweise auch negative Werte. Hitzewellen mit einer Länge von vier Tagen kamen in den 20 Regionen Deutschlands innerhalb der 15 Jahre 149 mal vor (Abbildung 39 links). Ihr Verlauf zeigt einen kontinuierlichen Anstieg mit einem deutlichen Sprung auf den vierten Tag, der eine Abweichung der Morbidität von ca. 10 % aufweist. Die vier Tage nach dem Ende der Hitzewelle haben immer noch eine deutlich erhöhte Morbidität, das Maximum im Verlauf zeigt sich sogar erst am ersten Tag nach der Hitzewelle mit 13,4 %. Der Verlauf von 8-tägigen Hitzewellen steigt bereits am zweiten Tag auf über 10 % an und bleibt anschließend relativ konstant bei Abweichungen der Morbidität um 10 % vom Erwartungswert. Das Maximum liegt am sechsten Tag mit 15 % Zunahme der Morbidität (Abbildung 39 rechts).

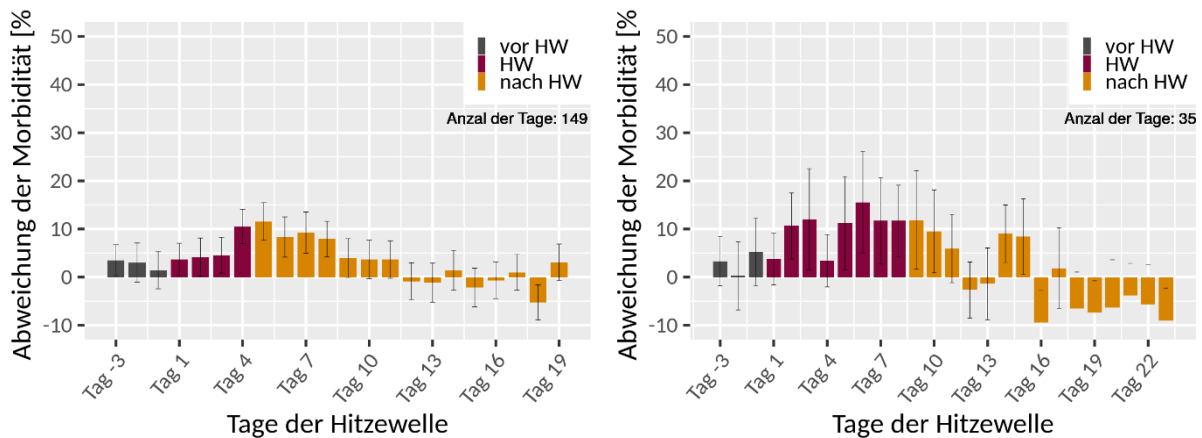
Werden die Diagnosen J40 – J47 nach Geschlecht getrennt betrachtet, zeigt sich, dass Frauen stärker von der Hitzewelle betroffen sind (Durchschnitt bei 7,5 %, Maximum bei ca. 20 %) als Männer (Durchschnitt bei 5,3 %, Maximum bei ca. 8 %) (Tabelle 19). Krankenhausaufnahmen aufgrund von COPD (J44) zeigen früh einen schnellen Anstieg bis zu einem flachen Maximum von ca. 11 %, welches über mehrere Tage kaum absinkt. Das Risiko während einer Hitzewelle ist um 7,7 % erhöht (Tabelle 19). Anders präsentieren sich die Asthma-Diagnosen (J45 – J46), die keine Reaktion auf Hitzewellen zu erkennen geben. Die Diagnosen J20 – J22 und die Cluster-Diagnose J40 – J43 + J47 weisen eine stark erhöhte Morbidität in den Sommermonaten auf, ein zusätzlicher Effekt von Hitzewellen ist nicht zu erkennen.

Abbildung 38: Prozentuale Abweichung der Morbidität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 39: Prozentuale Abweichung der Morbidität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) im Verlauf von 4-tägigen (links) bzw. 8-tägigen Hitzewellen (rechts) mit Tagen vor, während und nach den Hitzewellen.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Die hohe Morbidität dieser Atemwegsdiagnosen bei erhöhten Lufttemperaturwerten zeigte sich bereits bei der Untersuchung des Einflusses der thermischen Umwelt (siehe Kapitel 0). Ob diese starke sommerliche Abweichung für diese Diagnosen von akuten Infektionen der unteren Atemwege jedoch plausibel ist, müsste näher untersucht werden.

Die regionalen Auswirkungen von Hitzewellen auf die Morbidität zeigen ein leicht anderes Bild als das Risiko der Mortalität: Die Regionen Süd-West und Süd-Ost weisen höhere Morbiditätswerte auf als die anderen Regionen in Deutschland. Bei COPD (J44) ist das Risiko auch in der Region Nord deutlich höher als im Westen und Osten Deutschlands. Die Region Ost hat meist das geringste Risiko einer Krankenhausaufnahme.

Tabelle 19: Prozentuale Abweichung der Morbidität von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen in den Jahren 2001 – 2015 in Deutschland.

| Region | Änderung der Morbidität [%] J40 – J47 Gesamt | Änderung der Morbidität [%] J40 – J47 Frauen | Änderung der Morbidität [%] J40 – J47 Männer | Änderung der Morbidität [%] J44 | Änderung der Morbidität [%] J45 – J46 |
|-------------|--|--|--|---------------------------------|---------------------------------------|
| Deutschland | 5,8 | 7,5 | 5,3 | 7,7 | 0,1 |
| Nord | 3,8 | 4,7 | 3,5 | 7,6 | -1,3 |
| Nord-West | 5,6 | 6,8 | 4,7 | 6,9 | 0,7 |
| West | 5,3 | 6,9 | 4,3 | 8,2 | -4,6 |
| Mitte | 4,3 | 5,4 | 3,5 | 5,4 | 3,8 |
| Süd-West | 6,0 | 8,1 | 5,9 | 7,2 | 0,9 |
| Süd-Ost | 7,7 | 8,3 | 8,0 | 8,3 | 2,2 |
| Ost | 2,6 | 3,7 | 2,1 | 3,1 | 0,9 |

Erläuterungen: J44, COPD (chronisch obstruktive Lungenerkrankung); J45 – J46, Asthma bronchiale und Status astmaticus.

Die Morbidität aufgrund von Asthma bronchiale ist in den meisten Regionen geringer als der Erwartungswert, nur Region Mitte weist ein erhöhtes Risiko während Hitzewellen auf (Tabelle 19).

Krankenhausaufnahmen mit **ischämischen Herzerkrankungen** sind im Gegensatz zur Mortalität während Hitzewellen nicht erhöht (Tabelle 20 links). Dies stimmt mit den Erkenntnissen der Vorläuferstudie über ischämische Herzerkrankungen überein (Koppe et al. 2013a). Eine mögliche Erklärung für die geringe Auswirkung von Hitzewellen auf die Morbidität könnte eine rasche Sterblichkeit sein, bevor Personen die Symptome als bedrohlich wahrnehmen und ein Krankenhaus aufsuchen. Damit geht der Fall in die Mortalitätsstatistik ein, wird jedoch nicht als Krankenhausaufnahme registriert. Auch hier gilt zu bedenken, dass aufgrund des starken Wochenganges die Morbidität von ischämischen Herzerkrankungen nur unzureichend dargestellt werden kann und eine Interpretation schwierig macht (siehe auch Kapitel 5.1.4 und 6.2).

Tabelle 20: Prozentuale Abweichung der Morbidität von ischämischen Herzerkrankungen (Subtypen, Geschlecht) und verschiedener psychischen Störungen während Hitzewellen im Vergleich zum Erwartungswert gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 in Deutschland.

| ICD-10-Codes I | Änderung der ischämischen Morbidität [%] | | ICD-10-Codes F | Änderung der psychischen Morbidität [%] |
|------------------|--|--|----------------|---|
| I20 – I25 Gesamt | -4,8 | | F10 | 2,1 |
| I20 – I25 Frauen | -4,7 | | F32 – F33 | -1,4 |
| I20 – I25 Männer | -4,0 | | F43 | 1,0 |
| I20 | -6,0 | | F45 | 0,5 |
| I21 – I23 | -2,1 | | | |
| I24 – I25 | -2,2 | | | |

Ein Einfluss von Hitzewellen auf **Krankenhausaufnahmen mit psychischen und Verhaltensstörungen** ist abhängig von der spezifischen Diagnose zu untersuchen. Fälle von psychischen Störungen aufgrund von Alkohol (F10) haben ein erhöhtes Risiko ins Krankenhaus aufgenommen zu werden in den ersten acht Tagen einer Hitzewelle mit einer maximalen Änderung von ca. 5 % im Vergleich zum Erwartungswert. Die mittlere Änderung der Morbidität während Hitzewellen beträgt 2,1 % (Tabelle 20 rechts). Reaktionen auf Belastungs- und Anpassungsstörungen (F43) zeigen ebenfalls eine leichte Hitzereaktion mit einer Änderung der Morbidität um maximal 5 % an Tag 4 der Hitzewelle, die mittlere Änderung liegt bei 1,0 %. Somatoforme Störungen (F45) zeigen ein schwach erhöhtes RR von durchschnittlich 0,5 während Hitzewellen. Dagegen zeigen Krankenhausaufnahmen mit depressiven Störungen (F32 – F33) während einer Hitzewelle kein erhöhtes Risiko.

5.2.3 Auftreten von Hitzeperioden im Zuge des Klimawandels

5.2.3.1 Gebietsmittelwerte

Das 95. Perzentil der Lufttemperatur im Referenzzeitraum liegt im Deutschlandmittel bei Verwendung der Ensemble-Daten bei ca. 19,8 °C, regional schwankt es zwischen 19,4 °C in Region Nord und 20,7 °C in Region Ost (Tabelle 21). Die HYRAS-Daten geben mit 20,0 °C für Deutschland ein leicht höheres 95. Perzentil an (Tabelle A 11). Die Unterschiede in den Hitzewellen-Charakteristiken zwischen den HYRAS-Daten und den Ensemble-Daten sind minimal, was darauf hindeutet, dass die Klimamodelle die Charakteristik von Hitzewellen sehr gut simulieren.

Anhand mehrerer Charakteristiken der Hitzewellen kann die Veränderung ausgehend vom Referenzzeitraum bis zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts beobachtet werden (Tabelle 21). Das historische Ensemble gibt für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 eine mittlere Anzahl an Hitzewellen-Tagen von 13 Tagen pro Jahr an. Dies setzt sich zusammen aus einer mittleren Anzahl an Hitzewellen pro Jahr von 2,5 und einer durchschnittlichen Dauer von 5,2 Tagen. Definitiv sind keine wesentlichen regionalen Unterschiede zu beobachten, da für jeden Gitterpunkt das lokale 95. Perzentil als Schwellenwert verwendet wird. Die mittlere T_a der Hitzewellen-Tage (Intensität) liegt im Deutschlandmittel bei 21,9 °C.

Tabelle 21: Merkmale der Hitzewellen (HW) berechnet für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 mit dem historischen Ensemble für Deutschland und sieben deutsche Regionen.

| Region | 95. Perzentil [°C] | Anzahl HW-Tage / Jahr [Tage] | Anzahl HW / Jahr | Dauer der HW [Tage] | Intensität [°C] | Saison Start [Tag des Jahres] | Saison Ende [Tag des Jahres] |
|-------------|--------------------|------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| Deutschland | 19,8 | 13,0 | 2,5 | 5,2 | 21,9 | 180 | 221 |
| Nord | 19,4 | 12,5 | 2,4 | 5,3 | 21,5 | 177 | 220 |
| Nord-West | 19,9 | 12,4 | 2,3 | 5,1 | 22,2 | 177 | 218 |
| West | 20,2 | 12,9 | 2,4 | 5,1 | 22,4 | 178 | 221 |
| Mitte | 19,9 | 13,0 | 2,4 | 5,1 | 22,0 | 180 | 221 |
| Süd-West | 20,0 | 12,8 | 2,4 | 5,2 | 22,0 | 180 | 221 |
| Süd-Ost | 19,8 | 12,8 | 2,4 | 5,2 | 21,7 | 180 | 219 |
| Ost | 20,7 | 12,6 | 2,4 | 5,1 | 22,9 | 178 | 219 |

Der Saisonstart ist definiert als der erste Tag der ersten Hitzewelle im Jahr; dieser liegt durchschnittlich Ende Juni (180 Tag des Jahres), das Saisonende als letzter Tag der letzten Hitzewelle, liegt im Mittel in der zweiten Augustwoche (221 Tag des Jahres) (Tabelle 21).

Die von den Ensembles der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 projizierten Hitzewellen in den beiden Zeiträumen der Zukunft basieren auf denselben 95. Perzentilwerten wie die Hitzewellen im Referenzzeitraum. Das Klimaänderungssignal zwischen 1981 – 2010 und dem 30-jährigen Mittel 2021 – 2050 wird von beiden Szenarien für die Hitzewellen-Charakteristiken ähnlich angegeben (Tabelle 22, Tabelle 23). Die Anzahl der Hitzewellentage beträgt 2021 – 2050 knapp 23 Tage, was eine Zunahme von ca. 76 % gegenüber dem Referenzzeitraum ist. Diese Zunahme ist im Deutschlandmittel und in fast allen Regionen signifikant. Die Zunahme der Anzahl an Hitzewellen bis 2021 – 2050 liegt bei 52 % (3,8 Hitzewellen pro Jahr), auch diese Veränderung ist in den meisten Fällen signifikant (nur RCP 4.5-Szenario Regionen Nord und Nord-West nicht). Die durchschnittliche Dauer der Hitzewellen nimmt um ca. 18 % zu und beträgt im RCP 8.5-Szenario 6,2 Tage. Signifikant ist diese Änderung jedoch nur im Mittel für ganz Deutschland.

Das RCP 4.5-Ensemble gibt keine signifikante Änderung der Dauer für diesen Zeitraum an. Die Intensität der Hitzewellen steigt im Mittel um 2 % an, was einer mittleren T_a von 22,4 °C bzw. 22,3 °C (RCP4.5 bzw. RCP8.5) entspricht. Trotz des geringen Anstieges ist die Änderung in allen Regionen bis auf Nord und Nord-West signifikant. Die Veränderung der Saison der Hitzewellen ist bis zum Zeitraum 2021 – 2050 in vielen Regionen nicht signifikant, deutet aber vor allem im Süd-Westen eine Verlängerung der Saison um mindestens eine Woche an (Tabelle 22, Tabelle 23).

Tabelle 22: Merkmale der Hitzewellen (HW) berechnet für den Zeitraum „nahe Zukunft“ 2021 – 2050 mit den Ensembledaten des RCP 4.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland.

| Region | HW-Tage | Zunahme HW-Tage [%] | Anz. HW | Zunahme HWs [%] | Dauer [Tage] | Zunahme der Dauer [%] | Intensität [°C] | Zunahme Intensität [%] | Saisonstart * | Ver-schiebung Sai-son-start [%] | Sai-son-ende * | Ver-schiebung Sai-son-ende [%] |
|-------------|-------------|---------------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------|---------------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Deutschland | 22,2 | + 71 % | 3,8 | + 52 % | 6,1 | + 17 % | 22,4 | + 2 % | 170 | - 6 % | 228 | + 3 % |
| Nord | 20,3 | + 62 % | 3,5 | + 46 % | 5,7 | + 8 % | 21,9 | + 2 % | 173 | - 2 % | 226 | + 3 % |
| Nord-West | 19,4 | + 56 % | 3,5 | + 52 % | 5,5 | + 8 % | 22,5 | + 1 % | 168 | - 5 % | 227 | + 4 % |
| West | 21,3 | + 65 % | 3,6 | + 50 % | 5,9 | + 16 % | 22,9 | + 2 % | 170 | - 4 % | 228 | + 3 % |
| Mitte | 22,2 | + 71 % | 3,8 | + 58 % | 5,9 | + 16 % | 22,5 | + 2 % | 171 | - 5 % | 229 | + 4 % |
| Süd-West | 22,6 | + 77 % | 3,6 | + 50 % | 6,3 | + 21 % | 22,5 | + 2 % | 170 | - 6 % | 227 | + 3 % |
| Süd-Ost | 23,4 | + 83 % | 3,8 | + 58 % | 6,3 | + 21 % | 22,2 | + 2 % | 167 | - 7 % | 230 | + 5 % |
| Ost | 20,3 | + 61 % | 3,6 | + 50 % | 5,6 | + 10 % | 23,4 | + 2 % | 169 | - 5 % | 225 | + 3 % |

Erläuterungen: * Angegeben als Tag des Jahres. Signifikante Änderungen sind mit fetter Schrift markiert.

Tabelle 23: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Zeitraum „nahe Zukunft“ 2021 – 2050 mit den Ensembledaten des RCP 8.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland. Signifikante Änderungen in fett markiert.

| Region | HW-Tage | Zunahme HW-Tage [%] | Anz. HW | Zunahme HWs [%] | Dauer [Tage] | Zunahme der Dauer [%] | Intensität [°C] | Zunahme Intensität [%] | Saisonstart * | Verschiebung Saisonstart [%] | Saisonende * | Verschiebung Saisonende [%] |
|-------------|-------------|---------------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------|---------------|------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Deutschland | 22,9 | + 76 % | 3,8 | + 52 % | 6,2 | + 19 % | 22,3 | + 2 % | 170 | - 6 % | 229 | + 4 % |
| Nord | 21,9 | + 75 % | 3,6 | + 50 % | 5,9 | + 11 % | 21,8 | + 1 % | 172 | - 3 % | 228 | + 4 % |
| Nord-West | 20,6 | + 66 % | 3,6 | + 57 % | 5,8 | + 14 % | 22,5 | + 1 % | 169 | - 5 % | 226 | + 4 % |
| West | 22,0 | + 71 % | 3,8 | + 58 % | 5,9 | + 16 % | 22,9 | + 2 % | 172 | - 3 % | 227 | + 3 % |
| Mitte | 22,0 | + 69 % | 3,9 | + 62 % | 6,2 | + 22 % | 22,6 | + 3 % | 171 | - 5 % | 227 | + 3 % |
| Süd-West | 23,7 | + 85 % | 3,9 | + 62 % | 6,3 | + 21 % | 22,6 | + 3 % | 173 | - 4 % | 229 | + 4 % |
| Süd-Ost | 23,4 | + 83 % | 4,0 | + 67 % | 6,0 | + 15 % | 22,2 | + 2 % | 168 | - 7 % | 228 | + 4 % |
| Ost | 20,4 | + 62 % | 3,7 | + 54 % | 5,7 | + 12 % | 23,4 | + 2 % | 170 | - 4 % | 225 | + 3 % |

Erläuterungen: * Angegeben als Tag des Jahres. Signifikante Änderungen sind mit fetter Schrift markiert.

Das Klimaänderungssignal bis zum 30-jährigen Mittel 2068 – 2097 unterscheidet sich dagegen erheblich zwischen den beiden RCP-Szenarien. Während das RCP4.5-Szenario einen gemäßigten Anstieg der Hitzewellen projiziert (Tabelle 24), zeigt das RCP8.5-Szenario eine starke Zunahme der Hitzewellen und deren Charakteristiken (Tabelle 25). Die Anzahl der Hitzewellentage im RCP4.5-Szenario steigt um 138 % auf 31 Tage, die Anzahl der Hitzewellen selbst um 76 % auf 4,4 Hitzewellen pro Jahr (Tabelle 24). Die Zunahme der Dauer ist im RCP4.5-Szenario weiterhin nicht signifikant, die Intensität steigt um 2 %, regional um maximal 4 % an. Die Saison verlängert sich nach hinten um ca. 2,5 Wochen, ist aber nur regional signifikant. Das Ensemble des RCP8.5-Szenarios ergibt eine deutlich stärkere Zunahme der Hitzewellen (Tabelle 25). Die Hitzewellentage steigen auf bis ca. 54 Tage, was einer Zunahme von 317 % gegenüber dem Referenzzeitraum 1981 – 2010 entspricht. Die Anzahl der Hitzewellen steigt um ca. 148 %, die Dauer nimmt um 67 % signifikant zu. Die Intensität steigt um durchschnittlich 6 %, was einer Zunahme der mittleren T_a während Hitzewellen von 1,3 °C entspricht. Die Saison verändert sich sowohl zu ihrem Beginn, der signifikant früher eintreten wird (ca. 19 Tage früher) und zum Ende, welches sich um fast einen Monat nach hinten verschiebt.

Tabelle 24: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Zeitraum „ferne Zukunft“ 2068 – 2097 mit den Ensembledaten des RCP 4.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland. Signifikante Änderungen in fett markiert.

| Region | HW-Tage | Zunahme HW-Tage [%] | Anz. HW | Zunahme HWs [%] | Dauer [Tage] | Zunahme der Dauer [%] | Intensität [°C] | Zunahme Intensität [%] | Saisonstart * | Verschiebung Saisonstart [%] | Saisonende * | Verschiebung Saisonende [%] |
|-------------|-------------|---------------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------|---------------|------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Deutschland | 31,0 | + 138 % | 4,4 | + 76 % | 6,9 | + 33 % | 22,4 | + 2 % | 172 | - 4 % | 238 | + 8 % |
| Nord | 27,0 | + 116 % | 4,1 | + 71 % | 6,6 | + 25 % | 22,0 | + 2 % | 175 | - 1 % | 235 | + 7 % |
| Nord-West | 25,2 | + 103 % | 4,2 | + 83 % | 6,3 | + 24 % | 22,7 | + 2 % | 172 | - 3 % | 235 | + 8 % |
| West | 28,8 | + 123 % | 4,4 | + 83 % | 6,7 | + 31 % | 23,0 | + 3 % | 171 | - 4 % | 239 | + 8 % |
| Mitte | 30,4 | + 134 % | 4,5 | + 88 % | 6,9 | + 35 % | 22,7 | + 3 % | 171 | - 5 % | 239 | + 8 % |
| Süd-West | 32,7 | + 155 % | 4,6 | + 92 % | 6,9 | + 33 % | 22,8 | + 4 % | 173 | - 4 % | 239 | + 8 % |
| Süd-Ost | 33,3 | + 160 % | 4,8 | + 100 % | 6,8 | + 31 % | 22,5 | + 4 % | 170 | - 6 % | 239 | + 9 % |
| Ost | 26,6 | + 111 % | 4,2 | + 75 % | 6,3 | + 24 % | 23,5 | + 3 % | 172 | -3 % | 235 | + 7 % |

Erläuterungen: * Angegeben als Tag des Jahres. Signifikante Änderungen sind mit fetter Schrift markiert.

Tabelle 25: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Zeitraum „ferne Zukunft“ 2068 – 2097 mit den Ensembledaten des RCP 8.5 Szenarios und Veränderung der Merkmale im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 für Deutschland und sieben Regionen in Deutschland. Signifikante Änderungen in fett markiert.

| Region | HW-Tage | Zunahme HW-Tage [%] | Anz. HW | Zunahme HWs [%] | Dauer [Tage] | Zunahme der Dauer [%] | Intensität [°C] | Zunahme Intensität [%] | Saisonstart * | Verschiebung Saisonstart [%] | Saisonende * | Verschiebung Saisonende [%] |
|-------------|-------------|---------------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------|---------------|------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Deutschland | 54,2 | + 317 % | 6,2 | + 148 % | 8,7 | + 67 % | 23,2 | + 6 % | 161 | - 11 % | 249 | + 13 % |
| Nord | 45,3 | + 262 % | 5,4 | + 125 % | 8,4 | + 58 % | 22,5 | + 5 % | 165 | - 7 % | 249 | + 13 % |
| Nord-West | 42,8 | + 245 % | 5,9 | + 157 % | 7,2 | + 41 % | 23,2 | + 5 % | 160 | - 10 % | 251 | + 15 % |
| West | 50,5 | + 291 % | 6,3 | + 162 % | 7,9 | + 55 % | 23,7 | + 6 % | 159 | - 11 % | 251 | + 14 % |
| Mitte | 53,2 | + 309 % | 6,4 | + 167 % | 8,2 | + 61 % | 23,4 | + 6 % | 160 | - 11 % | 249 | + 13 % |
| Süd-West | 52,5 | + 310 % | 6,3 | + 162 % | 8,8 | + 69 % | 23,6 | + 7 % | 160 | - 11 % | 252 | + 14 % |

| Region | HW-Tage | Zunahme HW-Tage [%] | Anz. HW | Zunahme HWs [%] | Dauer [Tage] | Zunahme der Dauer [%] | Intensität [°C] | Zunahme Intensität [%] | Saisonstart * | Verschiebung Saisonstart [%] | Saisonende * | Verschiebung Saisonende [%] |
|---------|-------------|---------------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------|---------------|------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Süd-Ost | 50,7 | + 296 % | 6,5 | + 171 % | 8,5 | + 63 % | 23,2 | + 7 % | 160 | - 11 % | 250 | + 14 % |
| Ost | 45,0 | + 257 % | 5,9 | + 146 % | 7,4 | + 45 % | 24,2 | + 6 % | 163 | - 8 % | 246 | + 12 % |

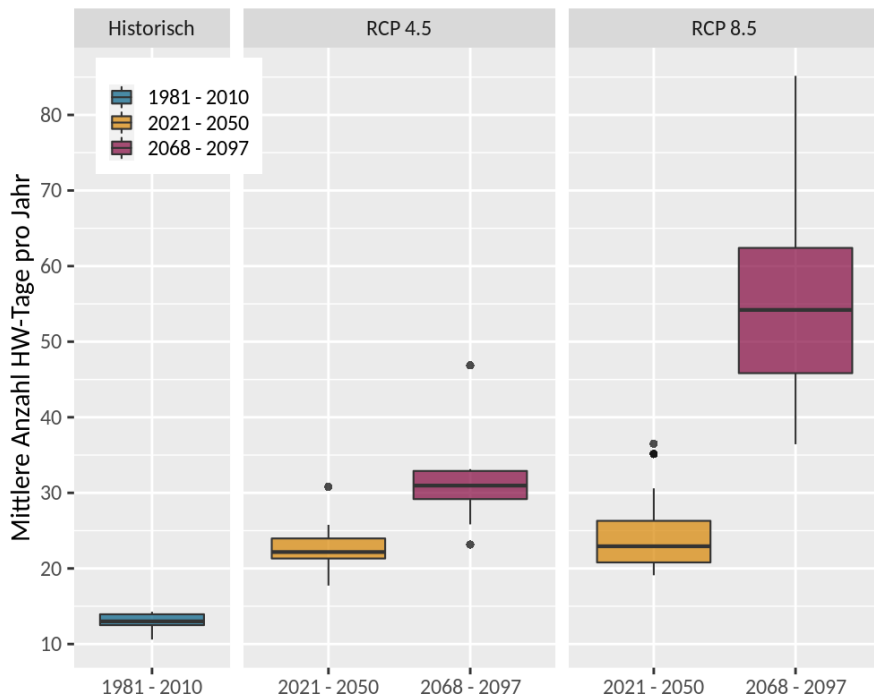
Erläuterungen: * Angegeben als Tag des Jahres. Signifikante Änderungen sind mit fetter Schrift markiert.

Die in den Tabelle 21 bis Tabelle 25 angegebenen Werte entsprechen dem jeweiligen Ensemble-Median. Trotz der Eindeutigkeit der Richtung des Klimasignals, ist die genaue Höhe der Änderung jedoch von einiger Modellunsicherheit geprägt. Die Streuung der Ergebnisse der einzelnen Member um den Ensemble-Median wird in den folgenden Abbildungen für den Deutschlandmittelwert gezeigt (Abbildung 40 – Abbildung 43). Die Box-Plots für die regionalen Ergebnisse sind im Anhang zu finden (Abbildung A 5 bis Abbildung A 8). Das historische Ensemble zeigt nur eine sehr geringe Streuung der mittleren Anzahl an Hitzewellentagen für den Referenzzeitraum, die im Bereich zwischen ca. 11 und 19 Tagen liegt (Abbildung 40). Bei der Betrachtung der Streuung innerhalb der Ensembles muss beachtet werden, dass die Ensemblegröße unterschiedlich ist, das historische Ensemble besitzt 33 Member, das RCP4.5-Ensemble 12 Member und das RCP8.5-Ensemble 21 Member.

Die Streuung des RCP4.5-Ensembles für die Zukunftszeiträume ist etwas größer als im historischen Ensemble (14 – 36 Tage 2021 – 2050 bzw. 21 – 50 Tage 2068 – 2097), einzelne Member liegen als Ausreißer (schwarze Punkte) sogar außerhalb der sogenannten Whisker-Linien, die den Abstand zwischen dem 25. und 75. Perzentil (Interquartilsabstand (IQR), untere und obere Boxgrenze) in Richtung des Maximums und Minimums maximal um das 1,5-fache verlängern (Abbildung 40). Die Streuung des RCP8.5-Ensembles ist deutlich stärker, da es mit 21 Membern auch größer ist als das RCP4.5-Ensemble. Je weiter der Zeitraum in der Zukunft liegt, desto größer wird die Streuung. Das 30-jährige Mittel 2021 – 2050 zeigt eine Streuung zwischen 16 – 38 Hitzewellen-Tagen, im Zeitraum 2068 – 2097 liegen Minimum und Maximum des RCP8.5 Szenarios bei ca. 29 Tagen und 90 Tagen.

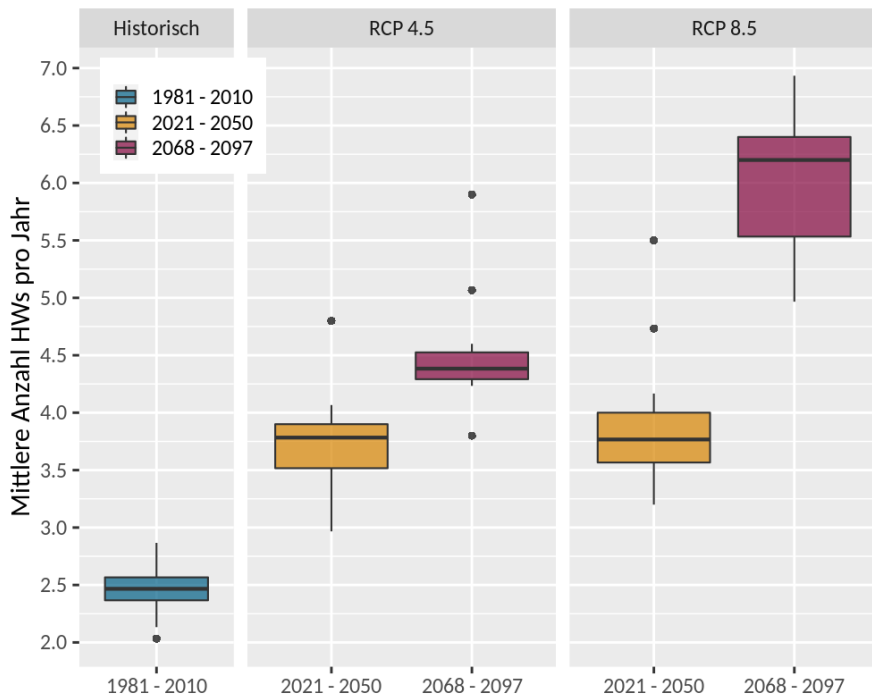
Die mittlere Anzahl der Hitzewellen (Abbildung 41) und die durchschnittliche Dauer (Abbildung 42) streuen ebenfalls, der Unterschied zwischen den Zeiträumen ist jedoch geringer, Ausreißer liegen eher oberhalb der Box als unterhalb. Die Ensemblewerte für die durchschnittliche Hitzewellen-Dauer der beiden RCP-Szenarien überschneiden sich teilweise mit den Werten aus dem historischen Ensemble, hier ist bereits zu erkennen, dass der Anstieg erst für den Zeitraum 2068 – 2097 signifikant ist. Die mittlere Intensität der Hitzewellen (Abbildung 43) steigt in Mittelwert für Deutschland schwach an, die Änderung ist gegenüber dem Referenzzeitraum aber signifikant. Der Unterschied im RCP4.5-Szenario zwischen den beiden Zeiträumen ist jedoch gering und nicht signifikant.

Abbildung 40: Mittlere Anzahl der Hitzewellen-Tage pro Jahr im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland.



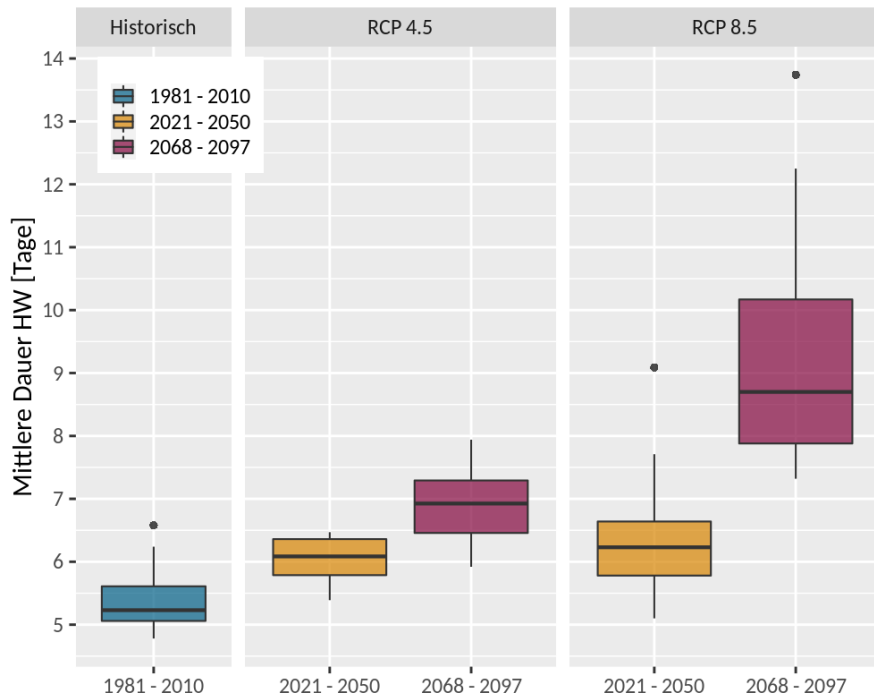
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 41: Mittlere Anzahl der Hitzewellen pro Jahr im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland.



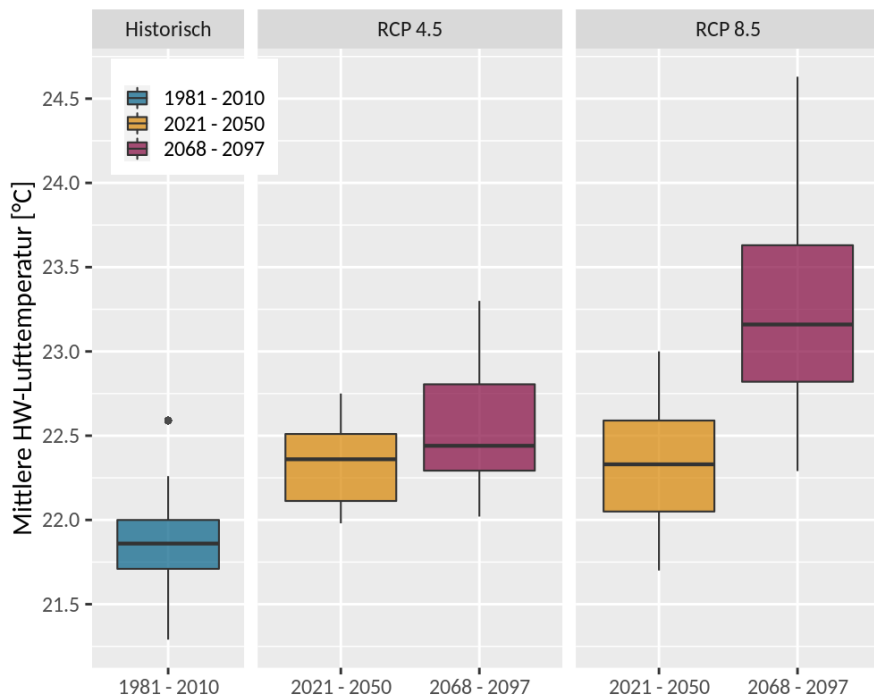
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 42: Mittlere Dauer der Hitzewellen im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Dauer in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung 43: Mittlere Intensität (T_a in °C) während Hitzewellen-Tagen im historischen Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) durch die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland.

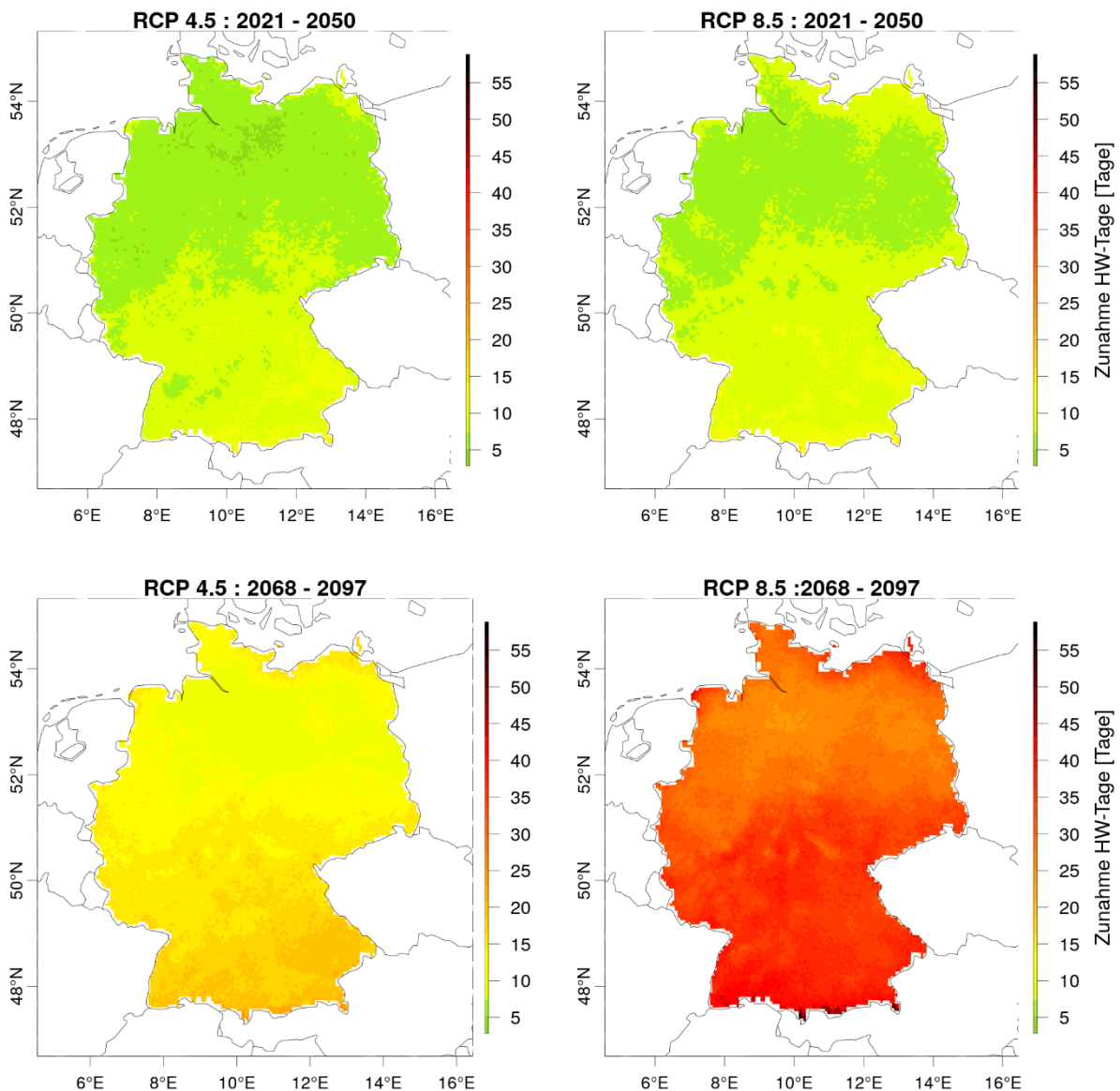


Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

5.2.3.2 Rasterdaten

Die Auswertung der Hitzewellen-Charakteristiken mit den Rasterdaten in einer Auflösung von 5x5 Kilometern zeigt eine detaillierte räumliche Verteilung der Hitzewellen. Die Zunahme der Hitzewellen und ihrer Charakteristiken im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 – 2010 ist regional unterschiedlich. Die Anzahl der Hitzewellen-Tage nimmt zwischen 1981 – 2010 und dem 30-jährigen Mittel 2021 – 2050 in den nördlichen Regionen mit ca. sieben zusätzlichen Tagen weniger stark zu als im Süden Deutschlands (Abbildung 44). Im Vergleich der beiden RCP-Szenarien für diesen Zeitraum ist zu erkennen, dass im RCP8.5-Ensemble vor allem in Mitteldeutschland eine etwas stärkere Zunahme der Hitzewellentage erfolgt. Im Zeitraum 2068 – 2097 ist die Zunahme im Vergleich zum Referenzzeitraum deutlich stärker ebenso wie die Unterschiede zwischen den beiden RCP-Szenarien.

Abbildung 44: Änderung der Anzahl der Hitzewellen-Tage im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten).

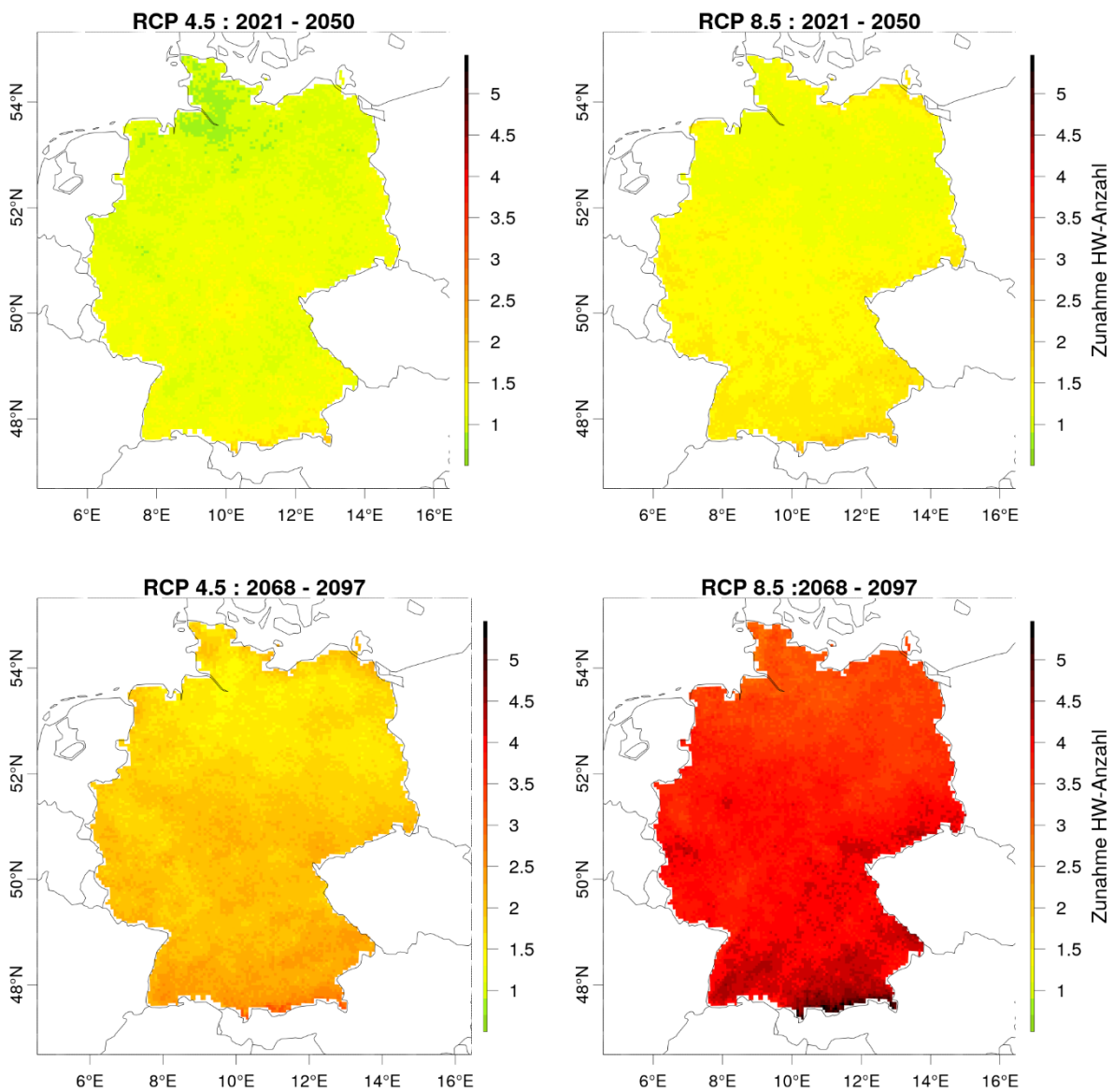


Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Im Vergleich der beiden RCP-Szenarien für diesen Zeitraum ist zu erkennen, dass im RCP8.5-Ensemble vor allem in Mitteldeutschland eine etwas stärkere Zunahme der Hitzewellentage erfolgt. Im Zeitraum 2068 – 2097 ist die Zunahme im Vergleich zum Referenzzeitraum deutlich stärker ebenso wie die Unterschiede zwischen den beiden RCP-Szenarien. Der Trend, dass vor allem der Süden Deutschlands vermehrt von Hitzewellen betroffen sein wird, setzt sich fort. Im Norden, Nord-Westen und Nord-Osten zeigt sich eine schwächere Zunahme.

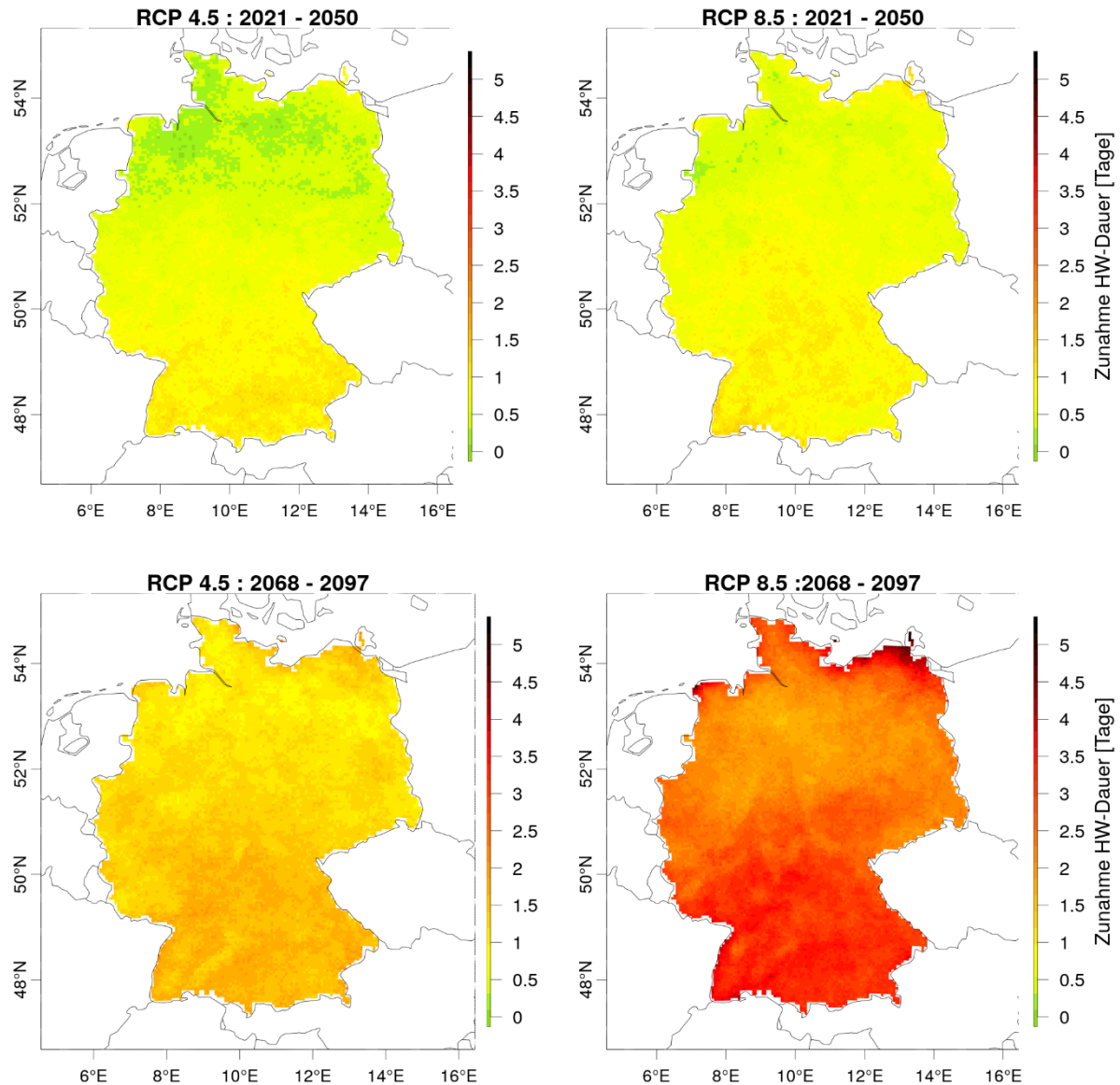
Derselbe Trend zeigt sich sowohl bei der Veränderung der Anzahl von Hitzewellen selbst (Abbildung 45) als auch bei der Zunahme der Dauer der Hitzewellen (Abbildung 46). Die regionale Auswertung zeigt jedoch auch eine Zunahme der durchschnittlichen Dauer im Norden und Nord-Osten an der Küste.

Abbildung 45: Änderung der mittleren Anzahl der Hitzewellen im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten).



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

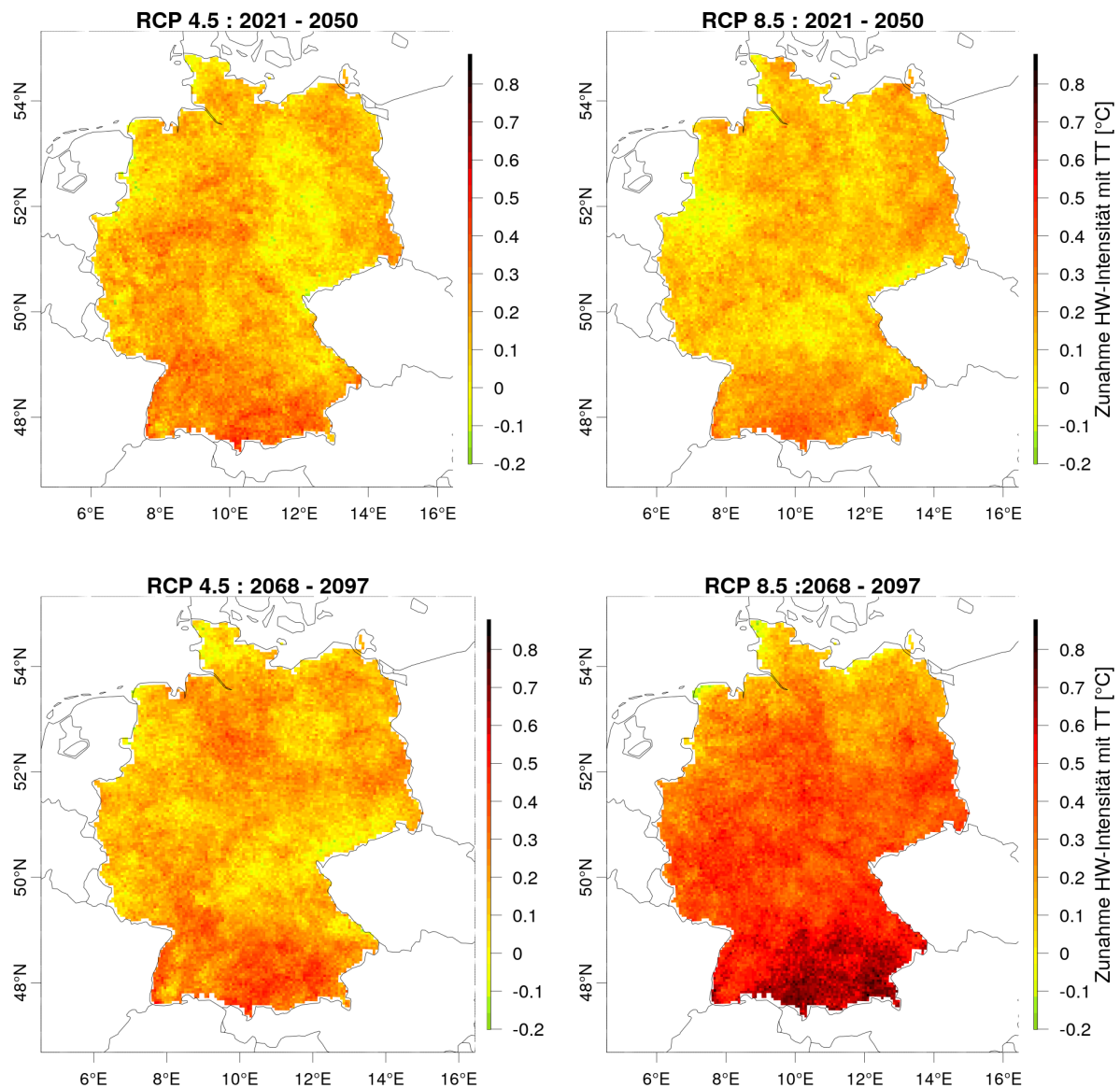
Abbildung 46: Änderung der mittleren Dauer von Hitzewellen im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten).



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Das Klimaänderungssignal zeigt bei der durchschnittlichen T_a während Hitzewellen geringere regionale Unterschiede, dennoch ist eine stärkere Erwärmung im Süden Deutschlands zu erkennen (Abbildung 47).

Abbildung 47: Änderung der mittleren Lufttemperatur während Hitzewellen im RCP4.5-Szenario für den Zeitraum 2021 – 2050 (links oben) und 2068 – 2097 (links unten) und im RCP8.5-Szenario für dieselben Zeiträume (rechts oben und unten).



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

5.2.4 Zukünftige Hitzeperioden und ihre Auswirkung auf die Mortalität

5.2.4.1 Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen

Während Hitzewellen erhöht sich die CLRD-Mortalität um durchschnittlich 18,1 % pro Tag, regional liegt die Abweichung zwischen 13,8 % und 21,8 % (siehe Kapitel 5.2.1). Dieser Wert gilt für jeden Hitzewellen-Tag gemittelt über alle Tage aller Hitzewellen unabhängig von der Dauer. Die Dauer spielt jedoch eine wichtige Rolle bei der Abschätzung des Mortalitätsrisikos einer Hitzewelle, weitere Faktoren sind die Intensität und der Zeitpunkt des Auftretens. Je länger eine Hitzewelle andauert, desto höher kann die Mortalität ansteigen bis sie ein Maximum erreicht und auf hohem Niveau verbleibt.

Die Mortalitätsdaten der chronischen unteren Atemwegserkrankungen liegen in einer zeitlichen Auflösung von 2-Tages-Werten vor, daher wurde hier eine veränderte Definition für Hitzewellen angewandt (siehe Kapitel 4.5). Die Anzahl der Hitzewellentage, berechnet mit der veränderten Definition, wird von dem historischen Ensemble für Deutschland mit 13,8 Tagen (ca. 7,0 Doppeltagen) angegeben (Tabelle 26). Diese Anzahl nimmt bis zur Mitte des Jahrhunderts um ca. 75 %, bis zum Ende des Jahrhunderts um 130 – 310 % zu, was einer Anzahl von gut 30 (RCP4.5) bis knapp 60 Tagen im Jahr (RCP8.5) entspricht. Die mittlere Anzahl der Hitzewellen pro Jahr liegt bei 2,1 und steigt auf bis zu 3,8 bzw. 4,9 Hitzewellen bis zum Ende des Jahrhunderts an. Die Dauer steigt von 6,5 Tagen (3,3 Doppeltage) auf 7,3 bis 7,9 in der nahen Zukunft 2021 – 2050 und auf 8,2 bis 11,0 Tagen bis zum Ende des Jahrhunderts. Diese Werte gelten für Deutschland als Flächenmittelwert, regionale Entwicklungen können der Tabelle A 12 in Anhang entnommen werden.

Tabelle 26: Hitzewellen-Charakteristiken mit 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur für den Deutschlandmittelwert der HYRAS-Daten, historischen Ensemble-Daten sowie die prozentuale Änderung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts für zwei RCP-Szenarien.

| HW-Charakter | HY-RAS | Historische Häufigkeit/Jahr 1981-2010 | RCP4.5 2021 – 2050 Anz. [Tage] | RCP4.5 2021 – 2050 Anstieg [%] | RCP4.5 1968 – 1997 Anz. [Tage] | RCP4.5 1968 – 1997 Zunahme [%] | RCP8.5 2021 – 2050 Anz. [Tage] | RCP8.5 2021 – 2050 Zunahme [%] | RCP4.5 1968 – 1997 Anz. [Tage] | RCP4.5 1968 – 1997 Zunahme [%] |
|----------------|--------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Anzahl HW-Tage | 13,7 | 13,8 | 24,0 | + 74 % | 32,3 | + 134 % | 24,1 | + 75 % | 56,6 | + 310 % |
| HW-Anzahl | 2,0 | 2,1 | 3,2 | + 52 % | 3,8 | + 81 % | 3,3 | + 57 % | 4,9 | + 134 % |
| HW-Dauer | 6,7 | 6,5 | 7,3 | + 12 % | 8,2 | + 26 % | 7,9 | + 22 % | 11,0 | + 69 % |

Erläuterungen: HW, Hitzewelle.

Die Abweichung der CLRD-Mortalität pro Tag während einer kurzen Hitzewelle (zwei Doppeltage) beträgt 12,9 % (Tabelle 27, Tabelle A 13). Das bedeutet, dass an jedem Tag einer kurzen Hitzewelle, die CLRD-Mortalität im Mittel um 12,9 % gegenüber dem Erwartungswert erhöht ist. Während Hitzewellen mit einer mittleren Dauer von 3 – 4 Doppeltagen liegt die Abweichung der Mortalität bereits bei 19,0 % und steigt weiter auf 21,9 % an Tagen einer langen Hitzewelle mit mindestens 5 Doppeltagen Dauer. Längere Hitzewellen treten seltener auf als kürzere Hitzewellen (Tabelle 26, Tabelle A 13). So nennt das historische Ensemble eine Häufigkeit von kurzen Hitzewellen von durchschnittlich einer pro Jahr (gemittelt über 30 Jahre). Hitzewellen mit einer mittleren Dauer treten durchschnittlich 0,7-mal pro Jahr auf, lange Hitzewellen 0,2-mal pro Jahr, was alle 5 Jahre bedeutet.

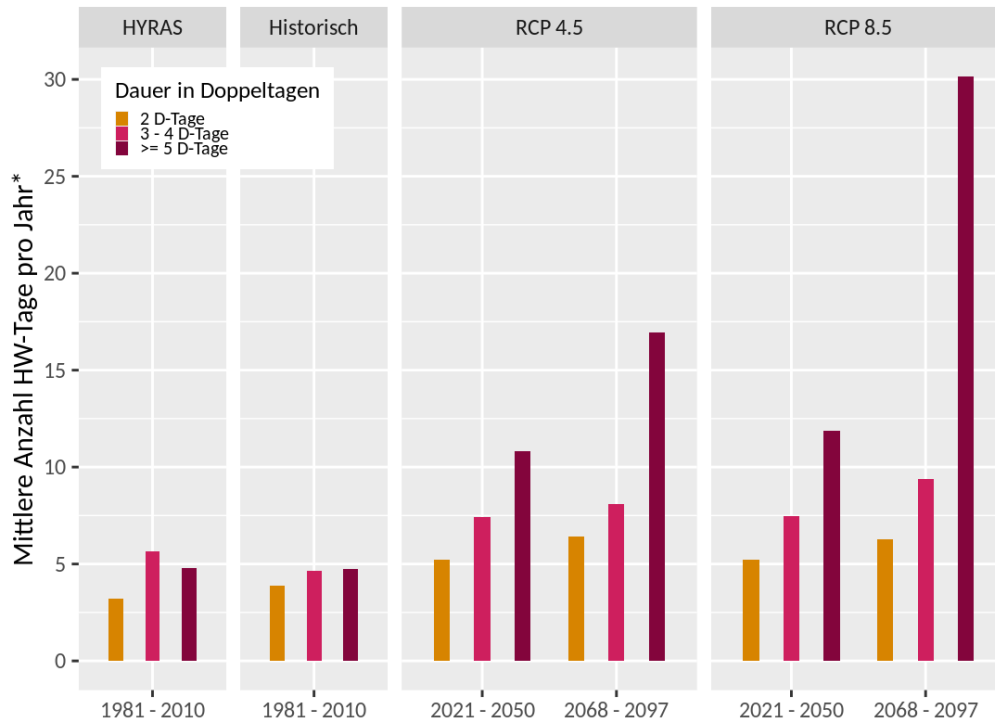
Längere Hitzewellen nehmen in ihrer Häufigkeit jedoch überproportional zu (Abbildung 48). Mit dem RCP8.5-Szenario ergibt sich eine Häufigkeit von langen Hitzewellen am Ende des Jahrhunderts von 1,8 Hitzewellen pro Jahr. In HW-Tagen ausgedrückt sind das ca. 30 Tage pro Jahr in dieser Hitzewellen-Kategorie, ein Anstieg um 540 %. HW-Tage von kurzen Hitzewellen nehmen im Vergleich nur um bis zu ca. 64 % zu.

Tabelle 27: Abweichung der Mortalität aufgrund von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) während Hitzewellen (HW) abhängig von ihrer Dauer und die Veränderung dieser Mortalität anhand zwei RCP-Szenarien für die nahe Zukunft (2021 – 2050) und ferne Zukunft (2068 – 2097) relativ zum historischen Referenzzeitraum in Deutschland und sieben Regionen.

| Region | Dauer der Hitzewellen | Abweichung der Mortalität / Tag | Ref. 1981 – 2010 Anzahl HWs | Ref. 1981 – 2010 HW-Tage* | RCP4.5 2021 – 2050 Zunahme [%] | RCP4.5 2068 – 2097 Zunahme [%] | RCP8.5 2021 – 2050 Zunahme [%] | RCP8.5 2068 – 2097 Zunahme [%] |
|-------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Deutschland | 2 D-Tage | 12,9 % | 1,0 | 3,9 | + 34 % | + 66 % | + 34 % | + 62 % |
| | 3-4 D-Tage | 19,0 % | 0,7 | 4,7 | + 59 % | + 74 % | + 60 % | + 101 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 21,9 % | 0,3 | 4,7 | + 128 % | + 258 % | + 151 % | + 537 % |
| Nord | 2 D-Tage | 17,6 % | 1,0 | 3,9 | + 43 % | + 47 % | + 34 % | + 48 % |
| | 3-4 D-Tage | 25,9 % | 0,7 | 4,4 | + 43 % | + 70 % | + 68 % | + 87 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 14,5 % | 0,3 | 4,8 | + 105 % | + 203 % | + 133 % | + 468 % |
| Nord-West | 2 D-Tage | 12,4 % | 1,0 | 4,0 | + 37 % | + 50 % | + 37 % | + 63 % |
| | 3-4 D-Tage | 19,3 % | 0,7 | 4,5 | + 65 % | + 75 % | + 70 % | + 116 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 25,0 % | 0,3 | 4,7 | + 80 % | + 185 % | + 116 % | + 456 % |
| West | 2 D-Tage | 9,9 % | 1,0 | 4,0 | + 30 % | + 58 % | + 33 % | + 57 % |
| | 3-4 D-Tage | 19,6 % | 0,7 | 4,5 | + 64 % | + 94 % | + 60 % | + 129 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 26,1 % | 0,3 | 4,3 | + 128 % | + 255 % | + 142 % | + 558 % |
| Mitte | 2 D-Tage | 16,0 % | 1,0 | 4,0 | + 33 % | + 47 % | + 27 % | + 63 % |
| | 3-4 D-Tage | 24,9 % | 0,8 | 5,1 | + 55 % | + 75 % | + 49 % | + 95 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 23,1 % | 0,3 | 4,3 | + 160 % | + 297 % | + 164 % | + 591 % |
| Süd-West | 2 D-Tage | 14,8 % | 1,0 | 4,0 | + 20 % | + 58 % | + 30 % | + 60 % |
| | 3-4 D-Tage | 16,4 % | 0,7 | 5,1 | + 45 % | + 87 % | + 61 % | + 92 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 27,3 % | 0,3 | 4,3 | + 182 % | + 364 % | + 197 % | + 664 % |
| Süd-Ost | 2 D-Tage | 17,9 % | 1,0 | 4,0 | + 38 % | + 52 % | + 43 % | + 57 % |
| | 3-4 D-Tage | 11,0 % | 0,7 | 4,9 | + 60 % | + 97 % | + 64 % | + 99 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 12,5 % | 0,4 | 4,6 | + 192 % | + 315 % | + 171 % | + 623 % |
| Ost | 2 D-Tage | 7,0 % | 1,0 | 4,1 | + 34 % | + 35 % | + 32 % | + 65 % |
| | 3-4 D-Tage | 17,0 % | 0,7 | 4,3 | + 77 % | + 88 % | + 62 % | + 137 % |
| | ≥ 5 D-Tage | 18,5 % | 0,3 | 4,7 | + 86 % | + 191 % | + 113 % | + 483 % |

Erläuterungen: * umgerechnet auf Einzeltage (2 Doppeltage ≈ 4 Einzeltage)

Abbildung 48: Mittlere Anzahl der Hitzewellen-Tage (2-Tages-Definition) pro Jahr über einen 30-Jahres Zeitraum für Deutschland (Flächenmittelwert) eingeteilt anhand ihrer Dauer in drei Kategorien für den Referenzzeitraum vergleichend mit Beobachtungsdaten (HYRAS) und historischen Ensemble sowie für die zukünftigen Zeiträume für zwei RCP-Szenarien.



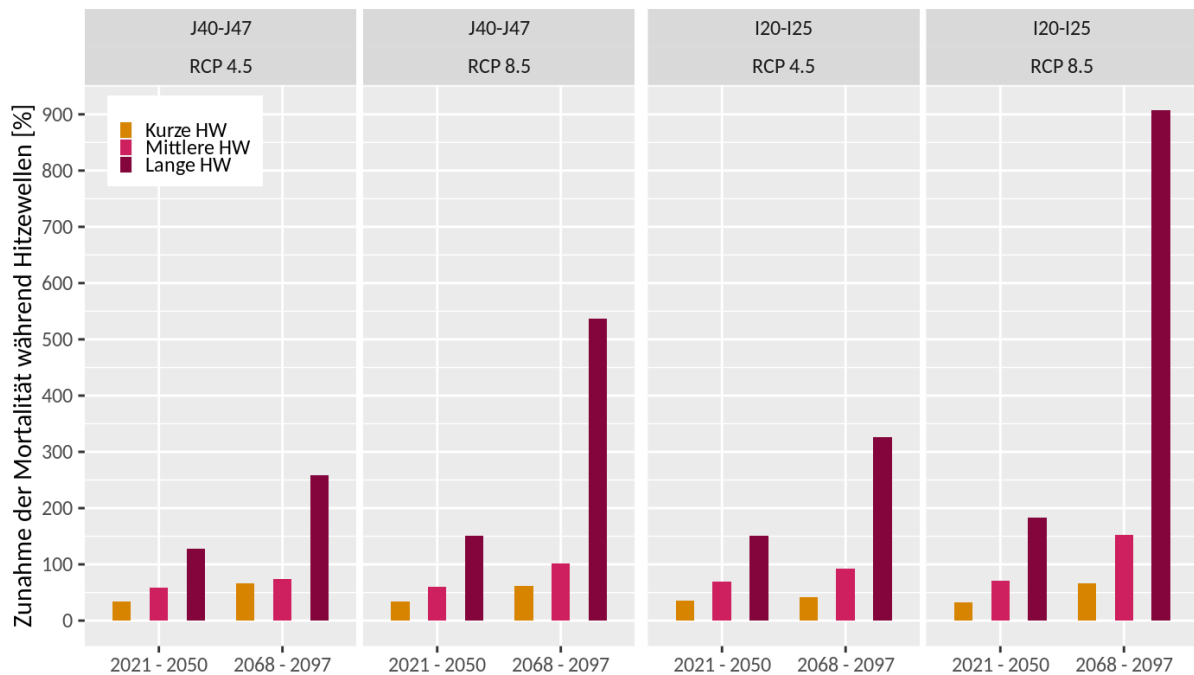
Erläuterungen: *HW-Tage sind bereits umgerechnet (2 Doppeltage \approx 4 Einzeltage). Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Anhand der Zunahme der Hitzewellen und ihrer Dauer, auch innerhalb der Kategorien, ergibt sich ein Anstieg der Hitzewellentage der jeweiligen Kategorie, die mit der Abweichung der Mortalität verrechnet wird. Mittels dieser Abschätzung zeigen die RCP-Szenarien eine Zunahme der hitzewellenbedingten CLRD-Mortalität während kurzer Hitzewellen von über 30 % im nahen Zukunftszeitraum und bis über 60 % in der fernen Zukunft 2068 – 2097 (Tabelle 27, Abbildung 49).

Die Abweichung der Mortalität während Hitzewellen mit einer mittleren Länge steigt deutlich stärker mit 60 % bis zur Mitte des Jahrhunderts und zwischen 70 % und 100 % am Ende des Jahrhunderts. Lange Hitzewellen mit mindestens 5 Doppeltagen führen jedoch zu dem stärksten Anstieg der Mortalität, in Deutschland bedeutet das bereits bis Mitte des Jahrhunderts einen Anstieg von 130 % bis 150 % und bis Ende des Jahrhunderts eine Zunahme der Abweichung der Mortalität um 250 % bis knapp 540 % (RCP4.5 bzw. RCP8.5) (Tabelle 27, Abbildung 49).

Bei der regionalen Analyse sind nur geringe Unterschiede zwischen den Regionen zu erkennen (Tabelle A 13). In der Region Süd-West zeigt das RCP8.5-Szenario Ende des Jahrhunderts einen Anstieg der Mortalität während langer Hitzewellen um 660 % an, was der höchste Wert aller Regionen ist. Die Zunahme während mittellangen Hitzewellen ist jedoch mit ca. 90 % etwas schwächer als in anderen Regionen. Dieses Muster lässt sich auch in den Regionen Mitte und Süd-Ost finden. In den Regionen Ost, Nord-West und West hingegen ist die Zunahme bei den mittleren Hitzewellen im Vergleich stärker, dafür steigt die Mortalität während langer Hitzewellen langsamer an.

Abbildung 49: Prozentuale Zunahme der CLRD-Mortalität (J40 – J47) und IHK-Mortalität (I20 – I25) während kurzer, mittlerer und langer Hitzewellen in der nahen (2021 – 2050) und fernen Zukunft (2068 – 2097) relativ zum historischen Referenzzeitraum für zwei RCP-Szenarien in Deutschland.



Erläuterungen: CLRD, chronische Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47); IHK, ischämische Herzerkrankungen (I20 – I25), HW, Hitzewelle. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

5.2.4.2 Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen

Während Hitzewellen ist die IHK-Mortalität um durchschnittlich 10,8 % pro Tag erhöht, regional liegen der Wert zwischen 6,9 % und 12,1 % (Region Nord bzw. West). Abhängig von der Dauer der Hitzewellen ist erkennbar, dass die Abweichung der Mortalität umso höher ist, je länger die Hitzewelle andauert. So ist die Mortalität in Deutschland während kurzer Hitzewellen (3 – 4 Tage) um ca. 10,0 % erhöht, steigt auf 10,5 % bei mittellangen Hitzewellen (5 – 9 Tage) und auf 13,6 % bei langen Hitzewellen (≥ 10 Tage) (Tabelle 28). In den Regionen Nord-West, West, Mitte und Süd-Ost ist ebenfalls die ansteigende Mortalität mit zunehmender Dauer der Hitzewelle zu erkennen. In den Regionen Nord, Süd-West und Ost sind vor allen bei den Hitzewellen mit einer mittleren Dauer eine geringere Abweichung der Mortalität im Vergleich zu den kurzen und langen Hitzewellen zu erkennen.

Die längeren Hitzewellen treten nicht so häufig auf wie die kürzeren. So kam im Referenzzeitraum 1981 – 2010 eine Hitzewelle mit mindestens 10 Tagen Dauer durchschnittlich nur alle 5 Jahre vor (0,2), wohingegen 3 – 4-tägige Hitzewellen im Mittel 1,3-mal im Jahr auftreten. Die leichte Abweichung der Gesamtzahl an Hitzewellen, zusammengesetzt aus den drei Kategorien mit unterschiedlicher Dauer (Tabelle 28, Tabelle A 14) im Vergleich zur Gesamtanzahl der Hitzewellen unabhängig der Dauer (Tabelle 21 – Tabelle 25) ergibt sich aus der Berechnung des Ensemble-Medians, der die Anzahl der Hitzewellen abhängig von ihrer Dauer leicht unterschätzt. Der Ensemble-Mittelwert bestätigt eine gleiche Anzahl an Hitzewellen in beiden Berechnungsmethoden. Die Entwicklung der Hitzewellen bis zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigt jedoch abhängig von ihrer Dauer eine unterschiedlich starke Zunahme der Hitzewellen (Tabelle A 14).

Tabelle 28: Abweichung der IHK-Mortalität während Hitzewellen (HW) abhängig von ihrer Dauer und die Veränderung dieser Mortalität anhand zwei RCP-Szenarien für die nahe Zukunft (2021 – 2050) und ferne Zukunft (2068 – 2097) relativ zum historischen Referenzzeitraum in Deutschland und sieben Regionen.

| Region | Hitzewellen-Anzahl / Jahr | Abweichung der Mortalität / Tag | Ref. 1981 – 2010 Anzahl HWs | Ref. 1981 – 2010 HW-Tage | RCP4.5 2021 – 2050 Zunahme [%] | RCP4.5 2068 – 2097 Zunahme [%] | RCP8.5 2021 – 2050 Zunahme [%] | RCP8.5 2068 – 2097 Zunahme [%] |
|-------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Deutschland | HW 3-4 Tage | 10,0 % | 1,3 | 4,6 | + 35 % | + 42 % | + 33 % | + 67 % |
| | HW 5-9 Tage | 10,5 % | 0,8 | 5,4 | + 70 % | + 92 % | + 71 % | + 152 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 13,6 % | 0,2 | 2,7 | + 151 % | + 326 % | + 183 % | + 907 % |
| Nord | HW 3-4 Tage | 9,2 % | 1,3 | 4,4 | + 34 % | + 39 % | + 48 % | + 77 % |
| | HW 5-9 Tage | 5,2 % | 0,8 | 5,3 | + 45 % | + 95 % | + 56 % | + 116 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 7,1 % | 0,2 | 2,6 | + 128 % | + 244 % | + 180 % | + 892 % |
| Nord-West | HW 3-4 Tage | 8,1 % | 1,3 | 4,5 | + 45 % | + 42 % | + 46 % | + 87 % |
| | HW 5-9 Tage | 10,2 % | 0,8 | 5,2 | + 43 % | + 84 % | + 58 % | + 161 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 13,3 % | 0,2 | 2,1 | + 126 % | + 317 % | + 194 % | + 931 % |
| West | HW 3-4 Tage | 10,3 % | 1,2 | 4,2 | + 42 % | + 69 % | + 49 % | + 97 % |
| | HW 5-9 Tage | 12,6 % | 0,8 | 5,3 | + 62 % | + 102 % | + 70 % | + 158 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 20,7 % | 0,2 | 2,6 | + 118 % | + 270 % | + 139 % | + 824 % |
| Mitte | HW 3-4 Tage | 8,7 % | 1,4 | 4,6 | + 41 % | + 47 % | + 40 % | + 73 % |
| | HW 5-9 Tage | 11,4 % | 0,8 | 5,2 | + 77 % | + 103 % | + 69 % | + 174 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 14,2 % | 0,2 | 2,7 | + 129 % | + 289 % | + 185 % | + 874 % |
| Süd-West | HW 3-4 Tage | 8,0 % | 1,3 | 4,4 | + 30 % | + 73 % | + 46 % | + 62 % |
| | HW 5-9 Tage | 7,3 % | 0,9 | 5,7 | + 63 % | + 77 % | + 66 % | + 156 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 14,2 % | 0,2 | 2,6 | + 192 % | + 395 % | + 216 % | + 1008 % |
| Süd-Ost | HW 3-4 Tage | 6,0 % | 1,3 | 4,5 | + 41 % | + 55 % | + 45 % | + 79 % |
| | HW 5-9 Tage | 7,2 % | 0,8 | 5,4 | + 77 % | + 116 % | + 77 % | + 164 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 7,2 % | 0,2 | 2,4 | + 223 % | + 406 % | + 253 % | + 1082 % |
| Ost | HW 3-4 Tage | 12,4 % | 1,4 | 4,8 | + 41 % | + 43 % | + 33 % | + 79 % |
| | HW 5-9 Tage | 7,1 % | 0,8 | 5,1 | + 54 % | + 96 % | + 63 % | + 162 % |
| | HW ≥ 10 Tage | 13,8 % | 0,2 | 2,3 | + 144 % | + 270 % | + 162 % | + 868 % |

Erläuterungen: HW, Hitzewelle; IHK, ischämische Mortalität.

Kürzere Hitzewellen mit 3 – 4 Tagen Dauer treten im Zeitraum 2021 – 2050 um 38 % und Ende des Jahrhunderts um 46 % bis 77 % häufiger auf (RCP4.5 bzw. RCP8.5). Hitzewellen mit mittlerer Dauer werden um 75 % bis Mitte und um 100 % bis 150 % am Ende des Jahrhunderts ansteigen und damit durchschnittlich zwischen 1,6 bis 2-mal im Jahr auftreten. Lange Hitzewellen nehmen sogar um zunächst 150 % bis 200 % zu, bis Ende des Jahrhunderts bedeutet das im Mittel statt alle 5 Jahre dann zwischen 0,8-mal bis 1,6-mal im Jahr. Zusätzlich zu der Häufigkeit nimmt auch die Dauer der Hitzewellen innerhalb der Kategorien zu, was zu einem Anstieg der Hitzewellentage innerhalb der langen Hitzewellen von 334 % bis zu 919 % im Vergleich zum Referenzzeitraum führt (Tabelle A 14).

Durch die überproportionale Zunahme der mittleren und langen Hitzewellen steigt die hitzewellenbedingte Mortalität stark an. Die Abweichung der Mortalität während der Hitzewellen steigt entsprechend der Zunahme der jeweiligen Hitzewellentage (Tabelle A 14). Die zusätzliche Mortalität während kurzer Hitzewellen nimmt bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts Deutschlandweit um 33 % bis 67 % zu (Tabelle 28). Bei Hitzewellen mit einer mittleren Dauer liegt die Zunahme der Mortalität bei 70 % bis 150 % (RCP4.5 bzw. RCP8.5) und bei langen Hitzewellen sogar bei mindestens 150 % Mitte des Jahrhunderts (RCP4.5), bis zum Ende des Jahrhunderts bedeutet das eine Zunahme von bis zu 900 % gegenüber dem Referenzzeitraum (RCP8.5). Die Zunahme der IHK-Mortalität während langer Hitzewellen bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts ist deutlich stärker als die CLRD-Mortalität. Der Grund dafür liegt in der unterschiedlichen Zunahme der Hitzewellentage in der Kategorie je nach Definition der Hitzewelle (1-Tages oder 2-Tages-Werte) (siehe Kapitel 6.4). Anhand des Unterschieds in der zeitlichen Auflösung der Mortalitätsdaten und damit auch der Berechnung der Hitzewellen ist der Anstieg der Mortalität während zukünftiger Hitzewellen nicht direkt miteinander vergleichbar.

Die regionale Analyse zeigt eine stärkere Zunahme der Mortalität aufgrund von langen Hitzewellen in den Regionen Nord-West, Süd-West und Süd-Ost, letzterer wird ein Anstieg von 1082 % (Anstieg der HW-Tage innerhalb langer HWs mit 7,2 % erhöhter Mortalität von 2,4 Tagen auf 28,4 Tage) vom RCP8.5-Szenario projiziert. Eine „ausgleichende“ geringere Zunahme der mittleren oder kurzen Hitzewellen ist nicht systematisch zu erkennen.

5.3 Auswirkungen einer Pollenbelastung auf Asthma

5.3.1 Pollen- und Morbiditätsdaten

Für die Untersuchungen im Zusammenhang mit einer gesundheitlichen Belastung durch Pollenallergene werden Morbiditätsdaten der Diagnosen Asthma bronchiale (J45) und Status asthmaticus (J46) verwendet. Die Verfügbarkeit der Pollendaten für nur fünf der sieben Regionen beschränkt die folgenden Analysen auf die Regionen Nord-West, West, Süd-West, Süd-Ost und Ost. Die mittlere Morbiditätsrate (Fälle pro Tag und 100 000 Personen) Diagnosen J45 und J46 liegt zwischen 0,08 und 0,15. Die Anzahl der Tage mit Geheimhaltungsfällen liegt in den Regionen zwischen 0,3 % und 25 % (Tabelle 29). Dies zeigt, dass in der Region West nicht nur in absoluten Zahlen die höchste Zahl an Asthma-Krankenhausfällen auftritt.

Für die Auswertungen wurden die täglichen Pollenkonzentrationen von Birke (*Betula*) und Gräser an Tagen mit Pollenkonzentrationen > Null der Jahre 2001 – 2015 ausgewählt. Damit sind die angegebenen Werte saisonal bedingt und nicht als Jahresmittelwerte zu verstehen (Tabelle 30). Die Gräserpollen gelten zusammengefasst für die Arten Mutterkorn (*Secale*), Weizengras (*Triticum*), Mais (*Zea*), Gerste (*Hordeum*) und Gräserpollen (*Poaceae*).

Tabelle 29: Morbiditätsdaten (Krankenhausaufnahmen) der zusammengefassten Diagnosen Asthma bronchiale (ICD-10-Code J45) und Status asthmaticus (ICD-10-Code J46) für die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Geheimhaltungsfälle (GF) markieren Tage mit Fallzahlen zwischen 1 – 5 Fällen.

| Region | Mittlere Fallzahl pro Tag | Anzahl Tage mit GF pro Jahr | Anzahl GF in % pro Jahr | Mittlere Morbiditätsrate |
|-----------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Nord-West | 14 | 11 | 3,11 % | 0,11 |
| West | 17 | 1 | 0,27 % | 0,15 |
| Süd-West | 8 | 91 | 25,06 % | 0,08 |
| Süd-Ost | 9 | 65 | 17,84 % | 0,10 |
| Ost | 11 | 39 | 10,63 % | 0,09 |

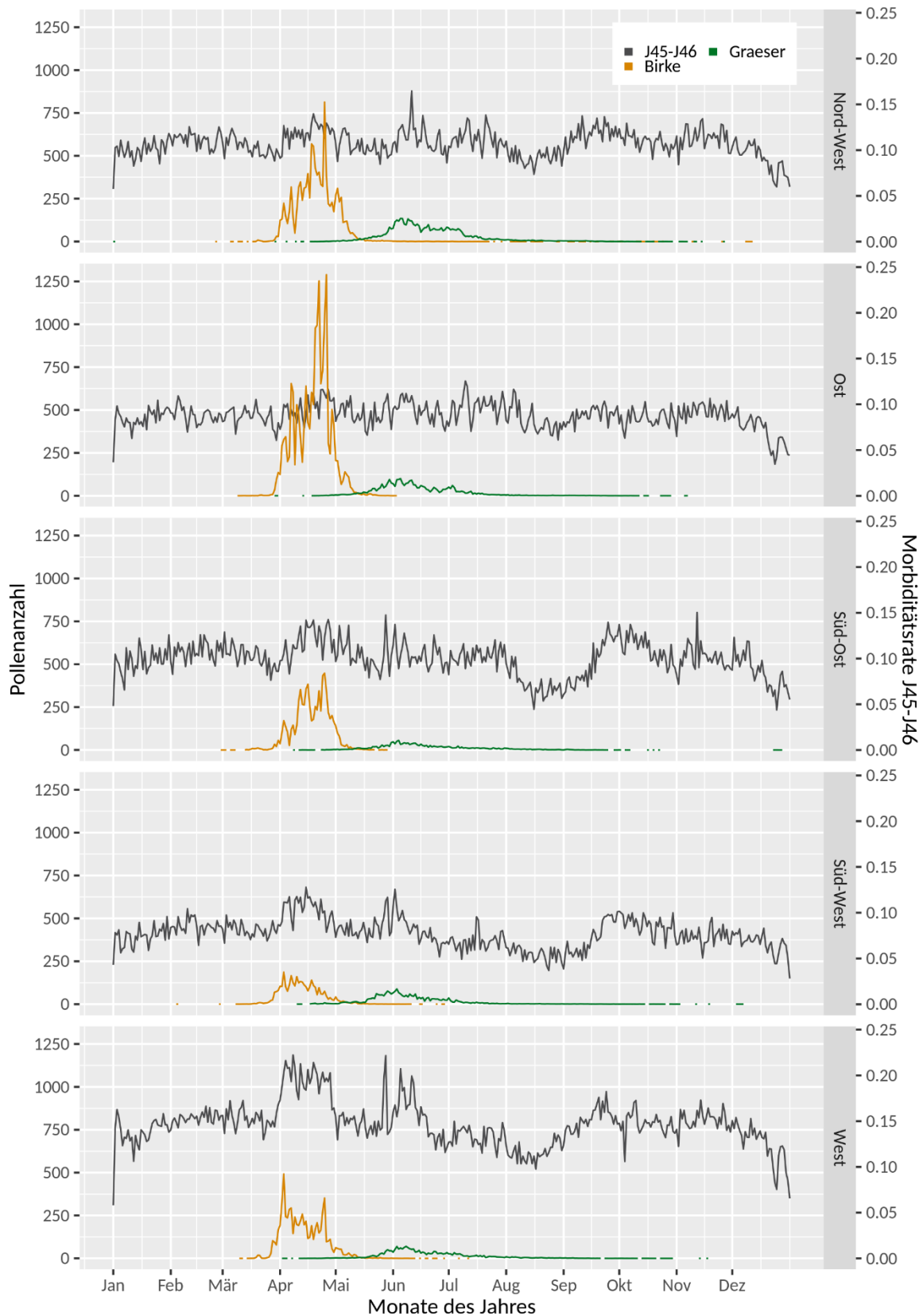
Tabelle 30: Tagesmittelwert, saisonales Maxima und Annual Pollen Integral der Birkenpollenkonzentration [P / m³] der Jahre 2001 – 2015 von fünf Stationen in Deutschland. Das Maximum und das Annual Pollen Integral ist als Median der saisonalen Werte berechnet.

| Region | Station | Tagesmittelwert Birkenpollen pro m ³ | Maximum Birkenpollen [P / m ³] | Annual Pollen Integral Birke [P / m ³] |
|-----------|-----------------|---|--|--|
| Nord-West | Delmenhorst | 49 | 1835 | 9477 |
| West | Mönchengladbach | 61 | 1055 | 7516 |
| Süd-West | Freiburg | 23 | 436 | 2842 |
| Süd-Ost | München | 82 | 1467 | 6899 |
| Ost | Dresden | 85 | 2648 | 13531 |

Es zeigt sich eine höhere Pollenkonzentration von Birkenpollen in den Regionen Süd-Ost und Ost; Gräserpollen sind vor allem in der Region Nord-West deutlich erhöht. Die potentielle Blühperiode der Birke liegt in den Regionen zwischen März und Mai, die Blühperiode der Gräser zwischen April und August. Die Saisonbestimmung innerhalb der potentiellen Blühperiode pro Jahr ist in Kapitel 4.6.3 erläutert.

Die über 15 Jahre gemittelten Jahresgänge der Pollenanzahl sowie der Morbiditätsrate von Asthma bronchiale zeigen bereits in einigen Regionen einen Zusammenhang (Abbildung 50). Der durchschnittliche Jahresverlauf der Raten der Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma bronchiale bzw. Status asthmaticus (J45 – J46) (in Abbildung 50 mit Faktor 10 multipliziert zu Darstellungszwecken) zeigt je nach Region nur geringe Schwankungen. Wiederum ist in Region West ein möglicher Zusammenhang zwischen ansteigenden Asthma-Raten und dem Auftreten von Birkenpollen zu erkennen. Im Gegensatz dazu lässt sich in der Region Ost kaum eine saisonale Schwankung der Asthma-Raten erkennen. Über den Sommer sind die Fallzahlen mit Asthma bronchiale auf einem niedrigen Niveau, bis sie Mitte September wieder leicht ansteigen und bis zum Winter leicht erhöht bleiben.

Abbildung 50: Mittlerer Jahresgang der Pollenanzahl von Birke und Gräser, und der Morbidität von Asthma bronchiale und Status asthmaticus (J45, J46) in fünf Regionen in Deutschland über die Jahre 2001 – 2015.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Die Birkenpollensaison nach der Saisonbestimmung des EAN (European Aeroallergen Network) beginnt in den Regionen frühestens Ende März und dauert im Durchschnitt zwischen 22 und 24 Tage. Innerhalb dieser kurzen Zeit kann die Pollenkonzentration sehr stark ansteigen. Der Zeitraum und die Dauer sind in den Regionen nicht sehr unterschiedlich. Werden jedoch die Konzentrationen betrachtet, zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Der Median der jährlichen Maxima liegt zwischen 435 P / m³ in der Region Süd-West und 2648 P / m³ in der Region Ost (Tabelle 30). Das 50. Perzentil der täglichen maximalen Birkenpollenkonzentration liegt zwischen 27,5 P / m³ in der Region Süd-West und 220 P / m³ in der Region Ost (Tabelle 31). Mit Ausnahme der Region Süd-West liegen damit die Werte des 50. Perzentils deutlich über dem Grenzwert des Pollenflug-Gefahrenindex von 50 P / m³ und teilweise auch über dem Grenzwert für eine hohe Belastung von 100 P / m³ nach Pfaar et al. (2017).

Tabelle 31: Grenzwerte für die Birkenpollenkonzentration, Saisonstart, -ende und durchschnittliche Dauer über die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Tagesmittelwert der Pollenkonzentration [P / m³].

| Region | Feste Grenzwerte [P / m ³] | 50. Perzentil [P / m ³] | Frühester Saisonstart | Spätestes Saisonende | Durchschnittliche Saisondauer |
|-----------|--|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|
| Nord-West | 50 / 100 | 94,0 | 01. April | 05. Mai | 24 |
| West | 50 / 100 | 119,0 | 04. April | 28. April | 24 |
| Süd-West | 50 / 100 | 27,5 | 25. März | 24. April | 25 |
| Süd-Ost | 50 / 100 | 220,0 | 04. April | 27. April | 22 |
| Ost | 50 / 100 | 162,0 | 10. April | 30. April | 23 |

Die Saison der Gräserpollen ist im Vergleich zu den Birkenpollen deutlich länger, die Konzentration der Gräserpollen erreicht innerhalb dieses Zeitraumes jedoch im mittleren Maximum nur ca. 114 – 254 P / m³ (Tabelle 32). Die Gräserpollensaison beginnt in den Regionen Anfang bis Mitte Mai und dauert im Durchschnitt 77 bis 95 Tage (Tabelle 33). Das 50. Perzentil liegt zwischen 64,0 und 122,0 P / m³. Die Grenzwerte von 30 P / m³ und 50 P / m³ werden mit dem 50. Perzentil in allen Regionen überschritten.

Tabelle 32: Tagesmittelwert saisonales Maxima und Annual Pollen Integral der Gräserpollenkonzentration [P / m³] der Jahre 2001 – 2015 von fünf Stationen in Deutschland. Das Maximum und das Annual Pollen Integral ist als Median der saisonalen Werte berechnet.

| Region | Station | Tagesmittelwert Gräserpollen pro m ³ | Maximum Gräserpollen [P / m ³] | Annual Pollen Integral Gräser [P / m ³] |
|-----------|-----------------|---|--|---|
| Nord-West | Delmenhorst | 41 | 254 | 4595 |
| West | Mönchengladbach | 17 | 142 | 1926 |
| Süd-West | Freiburg | 24 | 176 | 2232 |
| Süd-Ost | München | 11 | 114 | 1743 |
| Ost | Dresden | 16 | 202 | 3364 |

Tabelle 33: Grenzwerte für die Gräserpollenkonzentration, Saisonstart, -ende und durchschnittliche Dauer über die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Tagesmittelwert der Pollenkonzentration [P / m³].

| Region | Feste Grenzwerte [P / m ³] | 50. Perzentil [P / m ³] | Frühester Saisonstart | Spätestes Saisonende | Durchschnittliche Saisondauer |
|-----------|--|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|
| Nord-West | 30 / 50 | 95,2 | 05. Mai | 12. August | 82 |
| West | 30 / 50 | 122,0 | 13. Mai | 24. Juli | 90 |
| Süd-West | 30 / 50 | 76,4 | 10. Mai | 07. Juli | 77 |
| Süd-Ost | 30 / 50 | 64,0 | 05. Mai | 03. August | 95 |
| Ost | 30 / 50 | 75,0 | 01. Mai | 25. Juli | 80 |

5.3.2 Zusammenhang Birkenpollen und Asthma bronchiale

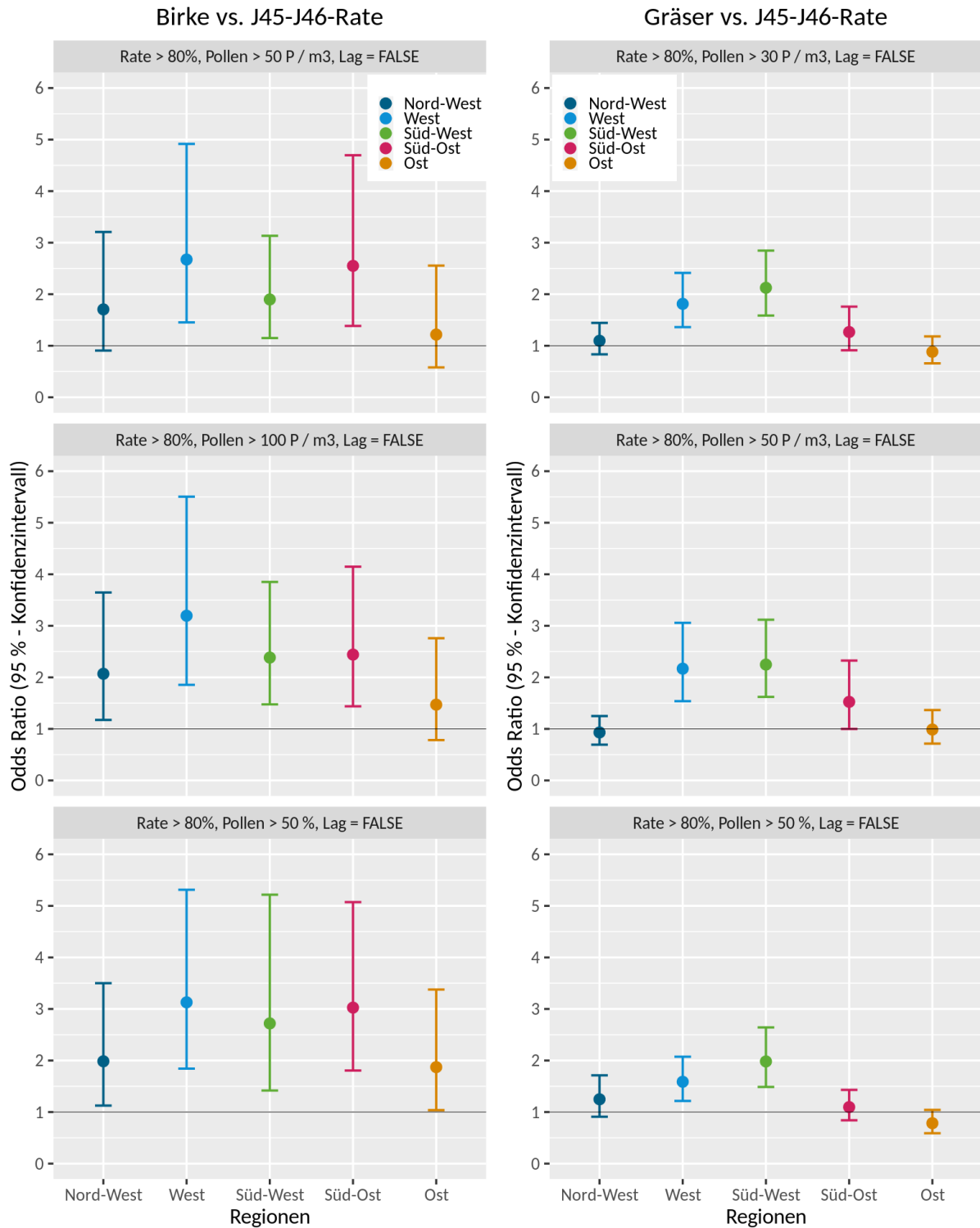
Für Tage mit einer hohen Belastung durch Birkenpollen wurde ein signifikant erhöhtes Risiko für Krankenhausaufnahmen mit einer Asthma bronchiale-Diagnose gefunden. Dies gilt für die Regionen West, Süd-West und Süd-Ost (Tabelle 34, Abbildung 51). In den Regionen Nord-West und Ost ist das Risiko nicht erhöht. Das OR in den anderen Regionen liegt zwischen 1,7 und 2,7, das Risiko eines Krankenhausaufenthaltes ist demnach um das bis zu 3,3-Fache erhöht. Bei höheren Grenzwerten der Birkenpollenbelastung konnte auch in der Region Nord-West (> 100 P/m³) ein signifikantes Risiko gefunden werden, die Region Ost zeigt nur bei der Verwendung des 50. Perzentils als Grenzwert (> 162 P/m³) ein signifikantes Ergebnis.

Tabelle 34: Kontingenztabelle für den Zusammenhang zwischen Tagen mit einer Birkenpollenkonzentration größer 50 P / m³ und Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma bronchiale (J45) oder Status asthmaticus (J46) für die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland (ohne Lag-Effekt).

| Region | Grenzwert | Erhöhte Morbidität | Geringe Morbidität | Auswertegröße | Werte (Konfidenzintervall)* |
|-----------|---------------------------|--------------------|--------------------|----------------|-----------------------------|
| Nord-West | P > 50 P / m ³ | 63 | 219 | OR (CI) | 1,70 (0,91 – 3,21) |
| | P < 50 P / m ³ | 14 | 83 | χ ² | 2,32 |
| West | P > 50 P / m ³ | 62 | 184 | OR (CI) | 2,67 (1,45 – 4,92) |
| | P < 50 P / m ³ | 15 | 119 | χ ² | 9,69 |
| Süd-West | P > 50 P / m ³ | 60 | 185 | OR (CI) | 1,90 (1,50 – 3,13) |
| | P < 50 P / m ³ | 27 | 158 | χ ² | 5,80 |
| Süd-Ost | P > 50 P / m ³ | 61 | 185 | OR (CI) | 2,55 (1,38 – 4,70) |
| | P < 50 P / m ³ | 15 | 116 | χ ² | 8,65 |
| Ost | P > 50 P / m ³ | 59 | 223 | OR (CI) | 1,21 (0,58 – 2,55) |
| | P < 50 P / m ³ | 10 | 46 | χ ² | 0,11 |

Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; OR, Odds Ratio; P, Pollenkörner; χ², Chi-Quadrat-Wert.

Abbildung 51: Odds Ratio (mit 95 % - Konfidenzintervall) für die Zusammenhänge zwischen einer erhöhten Birkenpollenkonzentration (links) oder einer erhöhten Gräserpollenkonzentration (rechts) und Krankenhausaufnahmen mit einer J45- oder J46-Diagnose für die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland. Der Grenzwert der Pollenbelastung ist im Titel der jeweiligen Grafik angegeben.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Ein asthmatischer Anfall, der eine Behandlung im Krankenhaus notwendig macht, ist eine gesundheitliche Reaktion, die sich nach der Exposition gegenüber einer hohen Pollenbelastung auch erst später z. B. durch Verschlechterung der allergischen Atemwegs-Symptome entwickeln kann. Wird ein Tag Verzögerung mit einberechnet (Lag-Effekt), wird vor allem der Wertebereich größer (breitere Konfidenzintervalle). In der Region West steigt das OR auf 16,39 (CI: 3,94 – 68,17), das Konfidenzintervall ist jedoch sehr breit. Die Wahl eines höheren Grenzwertes der Pollenbelastung zeigt vor allem bei der Verwendung des 50. Perzentils einen leichten Anstieg der OR, auch in der Region Ost ist das OR mit 1,85 (CI: 1,04 – 3,30) nun signifikant erhöht. Die Berücksichtigung des Lag-Effektes führt auch bei den höheren Grenzwerten teilweise zu sehr breiten Konfidenzintervallen.

5.3.3 Zusammenhang Gräserpollen und Asthma bronchiale

Der Zusammenhang zwischen Tagen mit hoher Gräserpollenkonzentration und Krankenhausaufnahmen mit Asthma bronchiale zeigt sich mit der angewandten Methode nur in den Regionen West und Süd-West als signifikanter Risikofaktor (Tabelle 35, Abbildung 51). Im Kontrast dazu liegt in der Region Ost das OR leicht, aber signifikant unter eins, das heißt, es wird hier als positiver Faktor dargestellt. Bei der Berücksichtigung eines Lag-Effektes bei dem Grenzwert von 30 P / m³ wurde auch für die Region Süd-Ost ein signifikantes Risiko gefunden, Region Nord-West bleibt nicht signifikant, Region Ost zeigt weiterhin ein signifikant reduziertes Risiko auf. Wenn das 50. Perzentil als Grenzwert verwendet wird, was in allen Regionen deutlich kleiner als 30 P/m³ (13 – 18 P/m³) ist, zeigen die Ergebnisse kaum Veränderungen, die Konfidenzintervalle werden jedoch kleiner. Eine Grenzwertanhebung auf 50 P / m³ mit und ohne Berücksichtigung von einem Tag Verzögerung erhöht das Risiko leicht, führt aber zu keiner Veränderung der Signifikanz in den Regionen (Abbildung 51).

Tabelle 35: Kontingenztabelle für den Zusammenhang zwischen Tagen mit einer Gräserpollenkonzentration größer 30 P / m³ und Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma bronchiale oder Status asthmaticus (J45 – J46) für die Jahre 2001 – 2015 in fünf Regionen in Deutschland (ohne Lag-Effekt).

| Region | Grenzwert | Erhöhte Morbidität | Geringe Morbidität | Auswertgröße | Werte (Konfidenzintervall)* |
|-----------|---------------------------|--------------------|--------------------|----------------|-----------------------------|
| Nord-West | P > 30 P / m ³ | 129 | 491 | OR (CI) | 1,10 (0,83 – 1,44) |
| | P < 30 P / m ³ | 126 | 526 | χ ² | 0,35 |
| West | P > 30 P / m ³ | 95 | 248 | OR (CI) | 1,81 (1,36 – 2,41) |
| | P < 30 P / m ³ | 179 | 847 | χ ² | 16,24 |
| Süd-West | P > 30 P / m ³ | 105 | 257 | OR (CI) | 2,12 (1,58 – 2,84) |
| | P < 30 P / m ³ | 135 | 702 | χ ² | 25,37 |
| Süd-Ost | P > 30 P / m ³ | 58 | 191 | OR (CI) | 1,27 (0,91 – 1,76) |
| | P < 30 P / m ³ | 222 | 926 | χ ² | 1,76 |
| Ost | P > 30 P / m ³ | 91 | 392 | OR (CI) | 0,88 (0,66 – 1,18) |
| | P < 30 P / m ³ | 146 | 555 | χ ² | 0,59 |

Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall; OR, Odds Ratio; P, Pollenkörner; χ², Chi-Quadrat-Wert.

Um einen möglichen Einfluss wärmerer Jahre auf den Effekt der Pollenbelastung zu überprüfen, werden die fünf wärmeren Jahre mit den fünf kälteren Jahren verglichen. Anhand des 70. und 30. Perzents der mittleren regionalen Lufttemperatur innerhalb der Pollensaison werden aus dem Zeitraum 2001 – 2015 je die fünf wärmsten und fünf kältesten Jahre pro Region ausgewählt. Die Pollensaison gilt für die Birke innerhalb des Monats April, für die Gräser gelten die Monate Mai, Juni und Juli. Die Untersuchung der wärmeren Jahre zeigt jedoch keine strukturellen Unterschiede zu kühleren Jahren bzw. zu der Analyse aller Jahre auf. Die Datengrundlage mit jeweils nur fünf Saisondaten aus fünf Jahren ist allerdings sehr gering für eine aussagekräftige Berechnung des OR.

6 Diskussion

6.1 Retrospektive Analyse der Mortalität

Die bevölkerungsbasierten Raten der atemwegs- und herzbedingten Mortalität zeigen den aus der Literatur erwarteten zumeist V-förmigen Zusammenhang zur thermischen Umwelt mit einem etwas flacheren aber längeren Anstieg auf der Seite der niedrigen Temperaturwerte und einem steileren aber kürzeren Anstieg hin zu hohen Temperaturwerten. Dieser Zusammenhang ist hauptsächlich durch den, noch nicht korrigierten, Jahresgang mit einem Maximum im Winter und einem Minimum im Sommer bedingt (Zacharias und Koppe 2015). Diese Winterübersterblichkeit gilt sowohl für die chronischen unteren Atemwegserkrankungen (CLRD) als auch für die ischämischen Herzkrankheiten (IHK). Doch wie auch andere Studien aussagen, muss darauf hingewiesen werden, dass diesem Jahresgang auch viele nicht-meteorologische Faktoren zugrunde liegen können und nicht allein der niedrigen Temperatur, sondern auch beispielsweise Bewegungsmangel, höherer Infektionsgefahr und Grippewellen maßgeblich zuzuschreiben sind (Ebi und Mills 2013).

Das mittels des Gaußfilterverfahrens herausgearbeitete Relative Risiko (RR) (Koppe 2005) zeigt im Vergleich zu den Mortalitätsraten ein nur noch geringfügig erhöhtes Risiko der Mortalität an kalten Tagen im Vergleich zum RR bei hohen Temperaturwerten. Der Anstieg oberhalb des Schwellenwertes zum Hitzeeffekt liegt für die Mortalität aufgrund von chronischen Atemwegserkrankungen bei ca. 3,6 % pro °C. Dieser Schwellenwert, der bei durchschnittlich 17,7 °C Tagesmittelwert der Lufttemperatur (15,6 °C – 19,1 °C in den sieben Regionen) liegt, ist etwas niedriger als die Werte, die andere Studien für Europa angeben, der zwischen ca. 20 °C in London (Ishigami et al. 2008) bis 29 °C in Lissabon (Almeida et al. 2013) variiert. Dies liegt jedoch vor allem an den unterschiedlichen Definitionen eines solchen Schwellenwertes z. B. über ein bestimmtes Perzentil der Tagesmitteltemperatur oder des Tagesminimums und nicht als einen an dem Gesundheitseffekt festgemachten Wert. In manchen Studien wird zudem unterschieden, ob der Schwellenwert für Kinder, Erwachsene oder ältere Personen gilt (Ishigami et al. 2008; Alessandrini et al. 2011). Eine solche Unterscheidung war in der vorliegenden Untersuchung aufgrund der Datenlage nicht möglich.

Die Zunahme der CLRD-Mortalität von 3,6 % pro °C im warmen Temperaturbereich lässt sich im unteren Bereich der Angaben anderer Studien einordnen, die wiederum meist eine Zunahme pro °C oberhalb eines bestimmten, hohen Perzentils (93. bis 97. Perzentil) angeben, was einen stärkeren Anstieg ergibt (Tabelle 36). Baccini et al. (2008) geben für das nördlich-kontinentale Europa eine Steigung der CLRD-Mortalität von 6,1 % pro °C ab einem Tagesmittelwert von 23 °C apparent temperature an (in der warmen Jahreszeit). Gasparrini et al. (2012) gibt für Großbritannien einen Anstieg der COPD-Mortalität um 4,3 % pro °C oberhalb des 93. Perzentils der Lufttemperatur an. Der Anstieg der CLRD-Mortalität um durchschnittlich 18,1 % pro Tag während Hitzewellen zeigt ebenso deutlich die Auswirkungen hoher Lufttemperaturwerte. Vor allem die Dauer der Hitzewelle hat einen starken Einfluss auf die Mortalität, erkennbar an der Zunahme der täglichen Mortalitätsabweichungen mit der Dauer der Hitzewellen. Auch in der Literatur gibt es Angaben zum Effekt von Hitzewellen. So geben Rey et al. (2007) für Frankreich eine Abweichung der atemwegsbedingten Mortalität während Hitzewellen von 6 % bis 13 % an (sechs Hitzewellen 1971 - 2003). Der Effekt der Hitzewellen hebt sich aber nicht immer signifikant vom Effekt einzelner heißer Tage ab (z. B. Sheridan und Lin 2014).

Tabelle 36: Auswahl an Studien mit Angabe zur Veränderung der atemwegsbedingten Mortalität mit dem Anstieg der Lufttemperatur pro °C aus den Jahren 2001 – 2018 im Vergleich zur vorliegenden Untersuchung.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Veränderung pro + 1 °C |
|---|---|-----------------------|------------|------------------------------|--|
| Vorliegende Untersuchung | Deutschland | 2001 – 2015 (419 589) | Ökologisch | CLRD; Alle | 3,6 % $T_a > 17,7$ °C |
| Almeida et al. (2013) | Portugal (Lissabon, Porto) | 2002 - 2004 (161 147) | Ökologisch | AK; Erwachsene, Ältere | 8 % $T_a > 29$ °C 4,7 % $T_a > 25$ °C |
| Baccini et al. (2008) | Europa (nördlich-kontinental, südlich-mediterran) | 1990 - 2001 (80 714) | Ökologisch | AK; Alle | 6,1 % $T_a > 23$ °C w.J. * 6,7 % $T_a > 29$ °C w.J. * |
| Basu und Malig (2011) | USA (Kalifornien) | 1999 - 2005 (47 212) | Ökologisch | AK; Alle | 0,8 % 7,6 % AT > 90. Perzentil |
| Gasparrini et al. (2012) | Großbritannien | 1985 - 2012 (289 516) | Ökologisch | AK, COPD, Asthma; Alle | 4,1 %, 4,3 %, 5,5 % $T_a > 93$. Perzentil |
| Hajat et al. (2002) | Großbritannien (Groß-London) | 1976 - 1996 (40 000) | Ökologisch | AK; Alle | 5,4 % $T_a > 97$. Perzentil / 21,5 °C |
| Goodman et al. (2003) | Irland (Dublin) | 1980 - 1996 (80 307) | Ökologisch | AK; Alle | 0,8 % $T_{a,min}$ |
| Linares et al. (2015) und Miron et al. (2015) | Spanien (Kastilien-La Mancha) | 1975 - 2008 (53 363) | Ökologisch | AK; Alle | 16,4 % $T_{a,max} > 37$ °C |
| Revich und Shaposhnikov (2008) | Russland (Moskau) | 2000 - 2006 (8 148) | Ökologisch | LRD; Alle | 8,7 % $T_a 18 - 25$ °C |
| Yu et al. (2011) | Australien (Brisbane) | 1996 - 2004 (4 583) | Ökologisch | AK; Alle | 9 % $T_a > 22$ °C |

* gilt nur in der warmen Jahreszeit.

Erläuterungen:

T_a , Lufttemperatur; $T_{a,min}$, Minimum der Lufttemperatur, $T_{a,max}$, maximum der Lufttemperatur;

Die Ergebnisse für die IHK-Mortalität stimmen mit denen der Vorläuferstudie und weiterer Literatur überein (Zacharias 2012). Die IHK-Mortalität weist mit 17,6 °C einen ähnlichen Schwellenwert zum Hitzeeffekt auf wie die CLRD-Mortalität, die Steigung von RR oberhalb fällt jedoch mit 2,6 % pro °C geringer aus. Während Hitzewellen zeigt die IHK-Mortalität durchschnittlich und auch im Maximum ebenfalls geringere Werte an (im Durchschnitt 10,8 % erhöhte Mortalität) als bei der CLRD-Mortalität. Andere Studien, die ebenfalls die kardiovaskuläre und atemwegsbedingte Mortalität untersucht haben, bestätigen die höhere atemwegsbedingte Mortalität an heißen Tagen oder während Hitzeperioden im Vergleich zu kardiovaskulären Todesfällen (Baccini et al. 2008; D'Ippoliti et al. 2010; Breitner et al. 2014; Bunker et al. 2016). Breitner et al. (2014)

geben einen prozentualen Anstieg der kardiovaskulären Mortalität bei einer Temperaturänderung vom 99. zum 90. Perzentil von 11 %, für die atemwegsbedingte Mortalität einen Wert von 23 % für Bayern an. Für die Hitzewelle 2003 (6. – 12. August) geben Hoffmann et al. (2008) für die Stadt Essen einen Anstieg der kardiovaskulären Mortalität um 30 %, die respiratorische Mortalität lag um 61 % höher und stieg in der Woche nach der Hitzewelle sogar auf 77 %, während die kardiovaskuläre Mortalität nach der Hitzewelle wieder zurückging.

Einige Studien geben einen Anstieg der CLRD-Mortalität im kalten Bereich an, der in der vorliegenden Studie mit einem sehr niedrigen Schwellenwert von $-6,6\text{ °C}$ kaum zu erkennen ist. Die CLRD-Mortalität zeigt keinen kontinuierlichen Anstieg von RR im niedrigen T_a -Bereich, sondern erst ab ca. -5 °C einen steilen Anstieg, der aber bei ca. -7 °C stoppt und kurz darauf unter den Erwartungswert sinkt. Dieser Verlauf ist anhand anderer Ergebnisse in der Literatur als fragwürdig einzustufen. Eine Interpretation der Kurven im Bereich niedriger Temperaturwerte wird auch dadurch erschwert, dass der Kälteeffekt erst nach einigen Tagen eintritt, dafür aber länger anhalten kann als der Hitzeeffekt. Eine Untersuchung des sog. Lag-Effektes zeigte ein höheres Risiko im kalten Bereich, wenn eine Verzögerung bis zu sieben Tagen berücksichtigt wird, an heißen Tagen reduziert sich RR durch den Lag-Effekt, die Unterschiede zwischen den einzelnen Lags sind jedoch gering. Untersuchungen zum Einfluss von niedrigen T_a -Werten auf Atemwegserkrankungen bestätigen einen signifikanten Anstieg der Mortalität vor allem von Älteren und COPD-Erkrankten (Analitis et al. 2008; Breitner et al. 2014; Zeka et al. 2014; Hajat et al. 2016). Eine Unterscheidung der Mortalitätsdaten nach Alter oder Geschlecht war aufgrund der fehlenden Daten in dieser Studie nicht möglich.

Der untere Schwellenwert hin zum Kälteeffekt liegt bei der IHK-Mortalität bei durchschnittlich $2,1\text{ °C}$ und damit höher als bei CLRD-Mortalität. Auch der Anstieg von RR im kalten Bereich ist deutlicher bei der IHK-Mortalität zu erkennen und in allen Regionen Deutschlands signifikant. Dies bestätigt die Ergebnisse von Breitner et al. (2014) die eine höhere kältebedingte Mortalität aufgrund von kardiovaskulären im Vergleich zu Atemwegserkrankungen angeben. Die zusätzliche Untersuchung von Kälteperioden (mindestens drei aufeinanderfolgende Tage mit $T_a < 5$. Perzentil) zeigt eine deutlich verzögerte Reaktion der CLRD- und IHK-Mortalität auf Kälte, der jedoch im Vergleich zu der Reaktion auf Hitzeperioden gering ausfällt und selten signifikant ist (Ergebnisse nicht dargestellt).

Der Vergleich der Kälte- und Hitzesensitivität der beiden Krankheitsgruppen scheint zunächst widersprüchlich. Aus medizinischer Sicht ist bei Atemwegserkrankungen eine erhöhte Reaktion vor allem bei kalten Temperaturwerten zu erwarten. Dass auch bei hoher Lufttemperatur ein Anstieg der CLRD-Mortalität auftritt, könnte darauf zurückzuführen sein, dass die CLRD-Mortalitätsdaten in der vorliegenden Studie nur die chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege enthalten, wovon ca. 88 % auf COPD-Erkrankte fallen. Diese chronische Erkrankung geht mit einer hohen Krankheitslast einher und steigt mit zunehmendem Alter, zusätzlich bestehen meist andere, ebenfalls chronische Ko-Erkrankungen, was den Allgemeinzustand stark beeinträchtigt (Steppuhn et al. 2017b). Dadurch ist auch die thermophysiologische Fähigkeit mit Hitze umzugehen eingeschränkt. Nicht enthalten in diesen Mortalitätsdaten sind damit Todesfälle aufgrund einer Influenza oder anderen akuten Infektionen wie Lungenentzündungen, die tendenziell eine stärkere Assoziation mit Kälte haben. In der Literatur, die ebenfalls Atemwegs- und Herzerkrankungen vergleicht, wird die stärkere Belastung der Atemwegserkrankten durch Hitze ebenfalls beschrieben (Hoffmann et al. 2008; D'Ippoliti et al. 2010; Breitner et al. 2014; Huynen und Martens 2015).

Bei dem direkten Vergleich der CLRD- und IHK-Mortalität in dieser Untersuchung muss beachtet werden, dass die zeitliche Auflösung der Daten unterschiedlich ist (2-Tages bzw. 1-Tages-Werte). Ein weiterer Unterschied ist die höhere räumliche Auflösung der IHK-Mortalität, die für

die Berechnung des Deutschlandmittelwertes verwendet wurde und 20 Regionen in Deutschland umfasst (CLRD-Mortalität: 7 Regionen). Eine Analyse der IHK-Mortalität mit einer reduzierten Auflösung auf ebenfalls 2-Tages-Werte und 7 Regionen hebt den Unterschied zwischen CLRD- und IHK-Mortalität in ihrer Reaktion auf Hitzebelastung hervor, da die hitzebedingte IHK-Mortalität erst bei einem etwas höheren Schwellenwert ansteigt, die Steigung bleibt relativ zur CLRD-Mortalität gesehen jedoch gleich (Schlegel et al. 2020). Der Vergleich in dieser Studie hat demnach trotz der Unterschiede Bestand.

Die regionale Betrachtung der Ergebnisse zeigt Unterschiede innerhalb Deutschlands auf. Die Regionen Nord, Süd-Ost und Ost zeigen anhand niedriger unterer Schwellenwerte eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Kältestress an. Die Regionen West, Mitte und Süd-West haben eine höhere Kältebelastung, dafür aber eine geringere Hitzebelastung, was sich in höheren oberen Schwellenwerten zeigt. Da aber hohe Lufttemperaturen häufiger in diesen Regionen auftreten, steigt das Risiko oberhalb des Schwellenwertes sehr steil an, das Maximum liegt meist über den anderen Regionen. Diese regionalen Unterschiede lassen sich durch die klimatischen Unterschiede in Deutschland und daraus resultierender Akklimatisierung der Bevölkerung erklären, sind aber auch beeinflusst durch Unterschiede in der Altersstruktur und Dichte der ärztlichen Versorgung.

Kleinräumige Variationen der Wetterbedingungen innerhalb einer Region, die durch Veränderungen der Topographie und der Landnutzung entstehen, können von den meteorologischen Messstationen, die als repräsentativ für die jeweilige Region ausgewählt wurden, nur bedingt abgebildet werden. Eine exakte Bestimmung der Exposition der Menschen ist generell nur schwer möglich, daher kann diese geringe Unsicherheit in Kauf genommen werden.

Die regionale Auflösung der Gesundheitsdaten wurde zur besseren Vergleichbarkeit auf sieben Großregionen in Deutschland beschränkt, obwohl einige der Daten in einer höheren Auflösung vorliegen. Durch die Zusammenfassung der teilweise regional höher aufgelösten Gesundheitsdaten und die Mittelung der Werte der entsprechenden meteorologischen Stationen können jedoch im Einzelfall Extremwerte verloren gehen und ihren direkten regionalen Bezug verlieren. Dadurch fallen Auswirkungen von Kälte- und Hitzeereignissen weniger stark auf als sie in den einzelnen Regionen vielleicht auftraten. Die Angaben zu einem Deutschlandmittelwert wurden jedoch immer mit der originalen Auflösung der Daten gerechnet, um Ungenauigkeiten dadurch zu minimieren.

Die **Vorläuferstudie** hat für die Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen sehr ähnliche Analysen durchgeführt (Zacharias und Koppe 2014; Zacharias und Koppe 2015). Die Methodik zur Auswertung des Zusammenhangs zwischen der Mortalität bzw. Morbidität und der thermischen Umwelt und der Hitzewellen wurde von der Vorläuferstudie übernommen. Die verwendete Datengrundlage der Mortalitätsdaten (2001 – 2010) ist jedoch unterschiedlich. Die retrospektiven Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen der IHK-Mortalität und der thermischen Umwelt aus der vorliegenden Untersuchung stimmen im Allgemeinen mit den Ergebnissen der Vorläuferstudie von Koppe et al. (2013a) überein. Die Daten der zusätzlichen fünf Jahre 2011 bis 2015 liefern eine größere Datengrundlage und dadurch mehr Fälle auch an Tagen mit extremen Lufttemperaturmittelwerten. Diese Bereiche können in der aktuellen Studie daher besser analysiert werden. Die Kurve des Relativen Risikos zeigt in beiden Studien einen ähnlichen Verlauf, der obere Schwellenwert liegt bei ca. 16 °C (Vorläuferstudie) bzw. 17,7 °C (aktuelle Studie), bei 25 °C liegt das RR bei ca. 1,1 (beide Studien). Die mittlere Abweichung der Mortalität während Hitzewellen liegt bei 10,5 % bzw. 10,8 % (Vorläufer- bzw. aktuelle Studie, Tabelle 37), die stärkere Belastung durch Hitze für Frauen und die Diagnosegruppe I24 – I25 konnte eben-

falls bestätigt werden. Die Übereinstimmung gilt im Allgemeinen sowohl für den deutschlandweiten Mittelwert der verschiedenen ICD-Gruppen als auch für die regionalen Ergebnisse in den sieben Großregionen.

Tabelle 37: Qualitativer Vergleich der hitzewellenbedingter Mortalität aufgrund ischämischer Herzkrankungen aus der Vorläuferstudie und der vorliegenden Untersuchung.

| ICD-10-Code | Abweichung der Mortalität [%] während HWs Werte der Vorläuferstudie | Abweichung der Mortalität [%] während HWs Werte der vorliegenden Untersuchung |
|------------------|---|---|
| I20 – I25 | 10,5 | 10,8 |
| I20 – I25 Frauen | 12,2 | 13,7 |
| I20 – I25 Männer | 8,1 | 9,1 |
| I20 – I22 | 8,2 | 8,4 |
| I24 – I25 | 12,5 | 13,9 |

Erläuterungen: I20 – I25, ischämische Herzkrankungen; I20 – I22, Angina Pectoris und akuter sowie rezidivierender Myokardinfarkt; I24 – I25, sonstige und chronische ischämische Herzkrankheit.

Bei einem direkten Vergleich der regionalen Ergebnisse muss beachtet werden, dass die sieben Großregionen, die in der aktuellen Studie für die Analyse herangezogen wurden, nicht alle dieselben Grenzen aufweisen wie bei der Vorläuferstudie und daher nicht alle direkt vergleichbar sind.

Der Einfluss der thermischen Umwelt auf die Mortalität wurde in der vorliegenden Untersuchung zusätzlich zur Lufttemperatur auch mit dem Humidex untersucht, der auch den Einfluss der Luftfeuchte mitberücksichtigt. Es ergaben sich jedoch keine systematischen Unterschiede in Abhängigkeit des Indexes. Dies konnte in einer weiteren Untersuchung derselben Mortalitätsdaten im Zusammenhang mit der Gefühlten Temperatur, einem komplexen thermischen Index unter Berücksichtigung der Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Strahlung und der menschlichen Energiebilanz, ebenfalls bestätigt werden (Schlegel et al. 2020).

Suizide zeigen mit einem Maximum des Jahresganges im Frühling und Frühsommer einen anderen Verlauf als die CLRD- und IHK-Mortalität. Dieser Anstieg stimmt mit der großen Mehrheit der Literatur überein (siehe Tabelle A 4), nur wenige Ausnahmen beobachten eine erhöhte Suizidanzahl oder Suizidversuche im Winter (Page et al. 2007; Gajić et al. 2011; Page et al. 2012). Der Anstieg im Frühling wird in der Literatur häufig mit der zunehmenden Sonnenscheindauer assoziiert (Müller et al. 2011; Vyssoki et al. 2012; Vyssoki et al. 2014), eine Kausalität dieser Korrelation unabhängig vom Jahresgang ist aber schwierig nachzuweisen (Hiltunen et al. 2011; White et al. 2015; Makris et al. 2016; Moore et al. 2018). Vyssoki et al. (2014) haben in Österreich festgestellt, dass eine positive Korrelation zwischen steigender SD und Suiziden für den Tag der Tat und die vergangenen 10 Tage (lag 0 – 10 Tage) gültig ist; hält die Sonnenscheindauer jedoch länger an (lag 14 – 60 Tage) wird die Korrelation von SD mit Suiziden negativ. Länger anhaltende erhöhte Sonnenscheindauer ist also ein Schutzfaktor. Die Korrelation mit SD bleibt nach der Kontrolle auf die Monate im Jahr signifikant, die Effektgröße ist jedoch nur noch schwach (Vyssoki et al. 2014). Im Zusammenhang mit der Sonnenscheindauer ist in der vorliegenden Untersuchung kein eindeutiger Trend gefunden worden, die Schwankungen von RR mit zunehmender Sonnenscheindauer in den Regionen sind groß.

Außerhalb der Meteorologie sind unter anderem Schwankungen im Hormonhaushalt ein häufig untersuchter Faktor. Eine Studie in Schweden hat, um den Effekt des Serotonins auf suizidales

Verhalten zu untersuchen, Suizid-Opfer danach unterschieden, welche und ob sie vorher Antidepressiva-Medikamente bekommen haben (Makris et al. 2016). Es stellte sich heraus, dass die Gruppe mit Antidepressiva, die die Serotonin-Konzentration im Gehirn erhöhen (selektive Serotonin-Wiederaufnahmehemmer, SSRIs) mit dem Zeitpunkt ihres Suizides stärker als alle anderen Gruppen mit der Sonnenscheindauer korrelierten und die Korrelation auch nach der Kontrolle auf die Jahreszeiten stabil blieb, während die anderen nicht mehr mit SD assoziiert waren.

Die Lufttemperatur kann ebenfalls einen Einfluss auf Suizide haben, so finden Page et al. (2007) bei Tagesmitteltemperaturen größer 18 °C einen Suizid-Anstieg pro °C von 3,8 %, unabhängig vom Jahresgang. Mit zunehmender Lufttemperatur konnte in der vorliegenden Untersuchung ein steigendes RR gefunden werden, im mittleren Temperaturbereich und an sehr heißen Tagen ist das Risiko erhöht, an kalten Tagen reduziert. Die Abweichung der Mortalität erreicht aber nicht mehr als 10 % im warmen und maximal 20 % im kalten Bereich ($0,8 \leq RR \leq 1,1$). Die Reaktion von Suiziden auf Hitzewellen ist ebenfalls schwach ausgeprägt. Aufgrund der wenig belastbaren Ergebnisse aus der retrospektiven Analyse, wurde darauf verzichtet, die Mortalität durch Suizid im Bezug zum Klimawandel zu untersuchen.

6.2 Analyse der Morbiditätsdaten

In der Vorläuferstudie stellte sich die Auswertung der Morbiditätsdaten der **ischämischen Herzerkrankungen** (IHK) bereits als schwierig heraus. Der Wochengang ist stark ausgeprägt und wird vermutlich von geplanten Eingriffen im Krankenhaus und nicht von Notfällen dominiert. Diese Gründe überlagern schnell einen möglichen Effekt der thermischen Umwelt, so dass er mit dieser Methodik nicht mehr nachweisbar ist (Koppe et al. 2013a).

Diese Erkenntnisse der Vorläuferstudie konnten in den neuen Untersuchungen bestätigt werden. Mittels eines für jeden Wochentag einzeln durchgeführten Gaußfilterverfahrens wurde in beiden Untersuchungen versucht, den Wochengang zu korrigieren, dennoch zeigte sich kein verwertbares Bild zum Zusammenhang zwischen der IHK-Morbidität und der Lufttemperatur. Auch bei Hitze- und Kälteperioden ist kein Anstieg zu erkennen. Das kann darauf hinweisen, dass die Methodik nicht ausreichend den Wochengang eliminieren konnte. In der Literatur wird der thermische Effekt auf die Morbidität jedoch auch seltener beschrieben als auf die Mortalität. Nicht alle Studien konnten eine signifikante Reaktion von Arzt-Besuchen, Notfällen oder Krankenhausaufnahmen auf Kälte oder Hitze nachweisen (z. B. Song et al. 2017).

Die Morbiditätsdaten zu **unteren Atemwegserkrankungen** (CLRD) unterliegen zwar auch einem deutlichen Wochengang, dieser fällt aber geringer aus als bei den IHK. Auch der Einfluss der Feiertage ist geringer. Mit der gleichen Methodik wie für die IHK-Morbidität lassen sich die Morbiditätsdaten der Atemwegserkrankungen auf einen Zusammenhang mit der Lufttemperatur hin untersuchen.

Das RR zeigt einen kontinuierlichen Anstieg mit zunehmender Lufttemperatur, im niedrigen Temperaturbereich ist RR reduziert, ab einem Schwellenwert von ca. 2,4 °C (1,3 °C – 7,9 °C je nach Diagnosegruppe) steigt das RR über den Erwartungswert, ab Tagesmittelwerten von über 17 °C liegt die Morbidität je nach Diagnosegruppe der Atemwege bei 10 % - 40 % über dem Erwartungswert. Dieser Schwellenwert bildet keine Grenze hin zur Wärmebelastung oder zum Kältestress, sondern zeigt lediglich auf, wo der risikoarme Bereich in den risikoreichen Bereich übergeht. Eine Berücksichtigung des Lag-Effektes von bis zu sieben Tagen zeigt ein leicht erhöhtes Risiko im Vergleich zum Tag Null, das RR verweilt dennoch weiterhin unterhalb des Erwartungswertes. Stärker ist der Effekt bei Kältewellen zu beobachten, während derer das RR reduziert ist, nach der Kältewelle jedoch signifikant ansteigen kann. Warum auch bei den Morbiditätsdaten das Risiko im unteren Temperaturbereich nicht erhöht ist, bleibt unklar. Wie bei der

CLRD-Mortalität sind auch bei den Morbiditätsdaten hauptsächlich die chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) analysiert worden, nur die Diagnosegruppe J20 – J22 enthält akute Infektionen der unteren Atemwege. Diese Krankenhausaufnahmen weisen jedoch das höchste RR durch Wärmebelastung auf, an kalten Tagen liegt RR deutlich unter eins und auch niedriger als die anderen Diagnosegruppen. Ein Grund für den Verlauf in dieser Untersuchung mit reduziertem RR im unteren Temperaturbereich findet sich bei der Betrachtung des Erwartungswertes, der sich nur bedingt den Variationen der Morbiditätsrate folgt und im Sommer zeitweise deutlich unter der Rate liegt.

Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Studien über diese Krankheitsgruppe, die meist ein hohes Risiko mit geringen Temperaturwerten angeben (z. B. Hajat und Haines 2002; Hajat et al. 2004; Mäkinen et al. 2009). Hajat und Haines (2002) geben für London steigende Morbidität pro °C abnehmende Temperatur von 8,5 % bei den oberen Atemwegserkrankungen, von 11 % bei den unteren Atemwegserkrankungen und von 12,4 % bei Asthma an. Eine weitere Studie von Hajat et al. (2016) konnte für COPD-Krankenhausaufnahmen einen Anstieg pro °C abnehmende Temperatur von 8,5 °C finden. Die Wirkung von Kälte entfaltet sich bei Atemwegserkrankungen vor allem durch das Einatmen von kalter Luft, weniger durch ihre Wirkung auf den gesamten Körper. Tests in einer Klimakammer zeigen, dass Menschen mit Belastungsasthma während sportlicher Übungen in einer Umgebungstemperatur von – 15 °C deutlich weniger Schwierigkeiten beim Atmen haben, wenn allein die Atemluft (über einen Beatmungsschlauch) auf 32 °C erwärmt wird (Sandsund et al. 2007).

Auffällig ist der Verlauf des RR der Asthma bronchiale-Fälle (J45 – J46) mit ansteigender Temperatur, der abweichend von den anderen ein Maximum im mittleren Temperaturbereich aufweist. Dies stimmt mit Jahresgang überein, der je ein Maximum im Frühling und Herbst aufweist. Dieser Verlauf wird in vielen anderen Studien bestätigt und verstärkt sich nochmals, wenn bei den Fällen nur Kinder berücksichtigt werden (z. B. Lee et al. 2012). Warum Asthmabeschwerden im Frühling und Herbst so ansteigen ist vermutlich durch vielerlei Faktoren begründet. Im Frühling können Pollen Auslöser für allergische Reaktionen sein, Tosca et al. (2014) geben für Kinder mit Asthma eine signifikante Korrelation mit Pollenallergenen, aber auch mit Windgeschwindigkeit, Regen, NO, NO₂, SO₂ und O₃ an. Im Herbst kann kaltes, trockene Wetter einen Einfluss auf Krankenhausaufnahmen von Kindern mit Asthma in New York haben (Lee et al. 2012). Der Wechsel von Sommerferien zum Schulbetrieb konnte jedoch auch als Ursache des Anstiegs der Fallzahlen bei Kindern im Herbst gefunden werden (Johnston et al. 2006; Lin et al. 2011). Das Leben von Kindern, der Aufenthalt verschiebt sich in Innenräume, Hausstaub oder Schimmelsporen können wiederum allergische Symptome auslösen. Im Winter zeigt sich jedoch ein Rückgang der Fallzahlen. Inwieweit sich der Jahresgang durch meteorologische Faktoren erklären lässt ist noch unklar. Die in dieser Untersuchung gewählte Methodik zur Berechnung des Erwartungswertes hat sich jedoch als ungeeignet für einen solchen Jahresgang mit zwei Maxima erwiesen.

Der Verlauf des RR der COPD-Morbidität (J44) ist sehr ähnlich zu denen der Gesamtgruppe J40 – J47 sowie der Subgruppen in der weiblichen und männlichen Bevölkerung, was dafür spricht, dass auch bei der Morbidität ein großer Anteil der Fälle bei COPD-Erkrankten liegt. Krankenhausaufnahmen aufgrund von COPD steigen pro °C um 0,5 % an. Ferrari et al. (2012) nennen für Bayern einen Wert von ca. 1,3 % Steigung der Arzt-Besuche von COPD-Erkrankten pro °C Temperaturanstieg. In den hier verwendeten Morbiditätsdaten ist ein Vergleich der atemwegsbedingten Krankheitslast in der weiblichen und männlichen Bevölkerung möglich. Die Ergebnisse bestätigen Aussagen früherer Studien, dass Frauen mit Atemwegserkrankungen stärker auf Wärmebelastung reagieren als Männer (z. B. Lin et al. 2009; Lin et al. 2012a; Monteiro et al. 2013). Andere Studien konnten jedoch keinen Unterschied zwischen den Geschlechtern bei der atemwegsbedingten Mortalität während Hitze feststellen (Anderson et al. 2013; Ogbomo et

al. 2017). Der Unterschied in der Belastung durch Kältestress zwischen den Geschlechtern ist in dieser Untersuchung gering, Männer zeigen jedoch eine Tendenz hin zu einer höheren Belastung durch Kältestress.

Aufgrund der Schwierigkeiten des Gaußfilterverfahrens, den mittleren Verlauf der atemwegsbedingten Morbiditätsraten ausreichend nachzubilden, sind die Ergebnisse der retrospektiven Analyse der atemwegsbedingten Morbidität nicht genügend belastbar. Daher wurde auf eine Analyse in Bezug auf den Klimawandel verzichtet.

Die Morbidität aufgrund von **psychischen- und Verhaltensstörungen** wurde als Kontrollgröße in die Studie mitaufgenommen. Es gibt wenige Studien, die ebenfalls Krankenhausaufnahmen für die Auswertung psychischer Störungen verwenden, jedoch weitaus mehr Untersuchungen, die Arztbesuche oder sogenannte Stimmungstagebücher als Datengrundlage nutzen, welche durch höhere Fallzahlen, flexiblere und vielfältigere Symptombeschreibung und durch die Nähe zu Patientinnen und Patienten erfolversprechender und daher zu bevorzugen sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen, dass die Morbidität anhand von Krankenhausaufnahmen nicht unbedingt ein ausreichendes Maß für das Auftreten oder die Verschlimmerung einer psychischen Störung ist. Probleme, die aufgrund einer bereits bestehenden psychischen Störung in Kombination mit dem Wetter entstehen, werden eher in seltenen Fällen im Krankenhaus erfasst. Zusätzlich fehlen die Informationen darüber, welcher Anteil der Krankenhausaufnahmen durch Notfälle und welcher durch geplante Termine zustande kommt.

Die saisonale Ausprägung ist eines der häufigsten Erkenntnisse in der Literatur, die aber je nach Krankheitsbild und Geschlecht anders ausfallen kann. Die Jahresgänge weisen bei allen vier Datensätzen der aktuellen Studie (ICD-10 F10, Störungen durch Alkohol; F32 – F33, depressive Störungen; F43, Reaktionen auf Belastungs- und Anpassungsstörungen; F45, somatoforme Störungen) ein Maximum im Januar auf, der Jahresgang ist jedoch wenig ausgeprägt. Depressive Störungen und somatoforme Störungen neigen zu einem leichten Maximum der Fälle im Herbst.

F10-Diagnosen zeigen am stärksten eine Reaktion auf die Lufttemperatur mit einer Zunahme an wärmeren Tagen (12 °C – 25 °C), eine leichte Reaktion auf Hitze ist während Hitzewellen zu beobachten. Somatoforme Störungen zeigen an sehr kalten und heißen Tagen ein erhöhtes Risiko, dieses ist jedoch nicht signifikant. In der Literatur herrscht relativer Konsens über die hohe Belastung von psychisch Erkrankten durch Hitze (Löhmus 2018) mit Ausnahme von affektiven Störungen wie Depressionen oder melancholische Stimmungen die am wenigsten eine Assoziation mit Hitze aufweisen (siehe Kapitel 2.3.3).

Die Auswertung dieser Morbiditätsdaten ergab keine belastbaren Ergebnisse im Zusammenhang mit der Temperatur. Dies ist zum Teil mit den bereits genannten Gründen zu erklären, andererseits erschwerte der ausgeprägte Wochengang und die schwach ausgeprägten Jahresgänge die Auswertung mittels des gewählten Gaußfilterverfahrens. Zusätzlich zum Wochengang kommt bei den Störungen aufgrund von Alkohol noch ein überlagernder Monatsgang dazu, der die Auswertung erschwert. Aufgrund der nicht belastbaren Ergebnisse wurde auf eine Untersuchung der IHK-Morbidität und der Morbidität aufgrund von psychischen und Belastungsstörungen in Bezug zum Klimawandel verzichtet.

6.3 Der Einfluss weiterer meteorologischer und lufthygienischer Parameter

Die thermische Komponente gilt als die wichtigste Einflussgröße, wenn der Effekt des Wetters auf die Mortalität und Morbidität betrachtet wird, dennoch auch können auch weitere Parameter wie die Luftfeuchte, Wind, Strahlung und Luftschadstoffe Einfluss auf die Gesundheit haben (Zacharias und Koppe 2015). Im Rahmen dieses Projekts wurde deswegen mittels nicht-linearer Regressionsmodelle (Generalized Additive Model, GAM) der Einfluss weiterer meteorologischer

und lufthygienischer Parameter auf die Mortalitäts- und Morbiditätsdaten untersucht. Zusätzlich zu meteorologischen Parametern wurde der Einfluss von Luftschadstoffen (Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub (PM₁₀) und Ozon (O₃)) mit Daten des Umweltbundesamtes geprüft.

GAMs wurden für die Auswertung der meteorologischen und lufthygienischen Parameter gewählt, da die Zusammenhänge zur Mortalität und Morbidität oft nicht-linear sind und nicht-lineare Modelle eine bessere Performance aufweisen können (Islam et al. 2017). Die Ergebnisse der GAMs bestätigen die Bedeutung der thermischen Parameter, von den weiteren Parametern leisten vor allem die Luftfeuchte, Luftdruck und Luftschadstoffe (vor allem SO₂ und PM₁₀) einen signifikanten Beitrag in den Modellen der chronischen Atemwegserkrankungen. Bei der atemwegsbedingten Morbidität konnte ein stärkerer Einfluss des Luftdruckes und zusätzlich auch von NO₂ gefunden werden. Im Modell der IHK-Mortalität sind ebenfalls Temperatur, Wasserdampfdruck, Luftdruck und Luftschadstoffe, hier vor allem Ozon, signifikant vertreten, bei der IHK-Morbidität zusätzlich der Parameter Windgeschwindigkeit, bei der Morbidität aufgrund von affektiven Störungen, somatoformen Störungen und Belastungs- und Anpassungsstörungen treten, neben den genannten Parametern, ebenfalls die Windgeschwindigkeit und NO₂-Werte signifikant im Modell auf.

Die GAM-Analyse bestätigte zudem die große Bedeutung der drei zeitlichen Komponenten Jahresgang, zeitlicher Trend und Wochengang in den Mortalitäts- und Morbiditätsdaten. Der Erklärungsanteil des Modells liegt für die CLRD-Mortalität zwischen 30 % - 50 %, wenn die zeitlichen Parameter aus dem Modell herausgenommen werden, werden noch 15 % - 25 % erreicht. Bei der atemwegsbedingten Morbidität ist der Unterschied noch deutlicher, da durch den Wochengang ein Großteil der Varianz erklärt werden kann. Der allgemein niedrige Erklärungsanteil der GAMs ohne zeitliche Parameter erklärt sich damit, dass neben dem Wetter bedeutendere Einflüsse auf die Mortalität und Morbidität wie Stress, Ernährung oder Veränderung von Lebensgewohnheiten gibt.

Ein genereller Nachteil bei der Interpretation eines GAMs besteht darin, dass keine Aussage über die Richtung des Zusammenhangs zwischen der Mortalität bzw. Morbidität und dem einzelnen Parameter gemacht werden kann. Da der Zusammenhang i.d.R. nicht-linear ist, kann auch kein Vorzeichen für die Beziehung angegeben werden. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Interpretation der sehr umfangreichen Ergebnisse wurde auf eine detaillierte Darstellung der GAM-Ergebnisse im Bericht verzichtet.

Die **Vorläuferstudie** hatte mittels Generalized Linear Models den Zusammenhang mit weiteren meteorologischen Parametern (Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer) analysiert und einen Erklärungsanteil von ca. 4 % für die IHK-Mortalität erreicht. Für keinen der Parameter wurde ein signifikanter Effekt gefunden. Die Wahl eines linearen Modells vereinfacht die Interpretation der Ergebnisse, diese erreichten in der Vorläuferstudie jedoch einen deutlich geringeren Erklärungsanteil als in der vorliegenden Untersuchung. Der Unterschied kann an dem nicht-linearen Charakter der Zusammenhänge liegen, doch auch in der Methodik liegen Unterschiede, die sich darauf auswirken. So wurde in der Vorläuferstudie anstelle der Mortalitäts- bzw. Morbiditätsrate, die Abweichung der jeweiligen Rate vom Erwartungswert verwendet. Damit sind die zeitlichen Komponenten Jahresgang, Wochengang und Trend nicht mehr im Regressionsmodell notwendig, jedoch die Unsicherheiten des Gaußfilterverfahrens in das Regressionsmodell überführt. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Verlauf des Jahresganges, des Wochenganges und des zeitlichen Trends im GAM direkt abgeschätzt.

6.4 Einfluss des Klimawandels auf den Temperatureffekt

Der Einfluss des Klimawandels auf die Mortalität ist sowohl durch die Veränderung der durchschnittlichen thermischen Umgebung als auch durch das Auftreten von Extremereignissen wie Hitzeperioden gegeben. Die Stärke des Einflusses zu quantifizieren stellt die Forschung vor viele Herausforderungen (McMichael et al. 2006; Gosling et al. 2012; Gosling et al. 2017). So stehen den zahlreichen Studien zum Zusammenhang der Temperatur mit der Mortalität im gegenwärtigen Klima noch weniger Untersuchungen gegenüber, die den thermischen Effekt des Klimawandels auf diese Beziehung quantitativ abschätzen (Peng et al. 2011; Gosling et al. 2012; Sheridan et al. 2012; Petkova et al. 2013; Hajat et al. 2014; Hales et al. 2014; Vardoulakis et al. 2014; Wu et al. 2014; Kingsley et al. 2016; Petkova et al. 2017).

Der Einfluss des sich ändernden Klimas auf die CLRD- und IHK-Mortalität wurde in der vorliegenden Untersuchung anhand der retrospektiv für Deutschland gefundenen Beziehung zur Lufttemperatur abgeschätzt. Die Temperatur-Assoziierte-Mortalität (TAM) für den gesamten Temperaturbereich zeigt in beiden RCP-Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) eine kontinuierliche und signifikante Zunahme sowohl für die nahe (2021 – 2050) als auch die ferne Zukunft (2068 – 2097). Eine signifikante Veränderung zwischen den Zeiträumen bedeutet hier auch, dass diese Änderung als (mindestens) wahrscheinlich angenommen werden kann, da das Kriterium (mindestens 66 % der regionalen Klimamodelle geben eine signifikante Änderung an) für beide Aussagen gilt (Mastrandrea et al. 2010).

Die CLRD-TAM liegt im Referenzzeitraum bei 0,1 % (Deutschland als Flächenmittelwert); die Zunahme dieser TAM beträgt bis zur Mitte des Jahrhunderts 0,4 %, was einer Vervierfachung entspricht. In der fernen Zukunft sagen die Klimasimulationen eine CLRD-TAM von 0,9 % (RCP4.5) bzw. 2,0 % (RCP8.5) voraus. Hier zeigt sich im Gegensatz zu den Ergebnissen der nahen Zukunft ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden RCP-Szenarien. Eine um 2,0 % erhöhte Mortalität, die dem Einfluss der Lufttemperatur zugeschrieben wird, klingt zunächst nach einem geringen Betrag, bedeutet aber eine Zunahme der TAM aus dem Referenzzeitraum um das 20-fache. Kingsley et al. (2016) geben für Rhode Island, USA, eine wärmebedingte (Zeitraum April - Oktober) Zunahme der Gesamtmortalität von ca. 1,6 % bis Ende des Jahrhunderts unter dem RCP8.5-Szenario an, Angaben spezifisch für die atemwegsbedingte Mortalität konnten aufgrund der geringen Fallzahlen nicht gegeben werden.

Die Zunahme der TAM, die über den gesamten Temperaturbereich berechnet wird zeigt, dass die Abnahme der Tage mit niedriger mittleren T_a und dem damit verbundenen geringeren Risiko nicht das wachsende Risiko zunehmend warmer und heißer Tage in Deutschland ausgleichen kann. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der TAM, wenn nur der T_a -Bereich unterhalb des unteren Schwellenwertes (Kälte-TAM) bzw. nur der Bereich oberhalb des oberen Schwellenwertes (Wärme-TAM) zur Berechnung verwendet wird. Die CLRD-Wärme-TAM liegt im Referenzzeitraum bereits bei 5,9 % (Deutschland als Flächenmittelwert) und steigt auf 7,9 % bis 10,3 % in der fernen Zukunft. Dagegen zeigt die CLRD-Kälte-TAM keine signifikante Änderung anhand der RCP-Szenarien in Deutschland als Flächenmittelwert. Der leichte, nicht-signifikante Anstieg der CLRD-Kälte-TAM in Deutschland und einzelnen der sieben Regionen ist dem Kurvenverlauf des Relativen Risikos zuzuschreiben. Diese zeigt keinen kontinuierlichen Anstieg von RR im niedrigen T_a -Bereich, sondern schwankend auch reduzierte RR und ist anhand anderer Ergebnisse in der Literatur als fragwürdig einzustufen. Daher ist die Aussagekraft der Kälte-TAM bei der CLRD-Mortalität deutlich eingeschränkt.

Andere Studien, die einen Kälteeffekt auf die Mortalität gefunden haben, nennen ebenso eine Reduktion dieser Belastung im Zuge des Klimawandels. Hajat et al. (2014) geben für England und Wales eine Zunahme der hitzebedingten ($T_a > 93.$ Perzentil) Gesamtmortalität von 169 % bis in

die 2050er Jahre und von 329 % bis zu den 2080er Jahren unter dem SRES-Szenario A1B an. Die kältebedingte ($T_a < 60$. Perzentil) Mortalität sinkt um 26 % resp. 40 % (2050er resp. 2080er Jahre). Wird ein Bevölkerungswachstum und zunehmende Alterung der Gesellschaft berücksichtigt, erhöht sich die temperaturabhängige Mortalität, was sich durch stärkere Hitzebelastung und einer geringeren Abnahme der Belastung durch Kälte zeigt (Hajat et al. 2014). Vardoulakis et al. (2014) konnten ebenfalls eine Zunahme der temperaturabhängigen Mortalität aufgrund zunehmender Alterung der Bevölkerung feststellen. Eine Untersuchung der thermischen Belastung nach Alter konnte aufgrund der fehlenden entsprechenden Datengrundlage nicht durchgeführt werden.

Die Beobachtung, dass eine Reduktion der Kälte-assoziierten Mortalität den Anstieg der Wärme-assoziierten Mortalität nicht ausgleichen kann, kann ebenfalls durch die Ergebnisse der IHK-Mortalität bestätigt werden. Es konnte zwar eine bis zur Mitte und Ende des Jahrhunderts signifikante Abnahme der IHK-Kälte-TAM um 0,1 % bis 0,2 % gefunden werden. Die IHK-Wärme-TAM steigt jedoch bis zum Ende des Jahrhunderts um 1,1 % bzw. 2,4 % (RCP4.5 bzw. RCP8.5). Das bedeutet, dass im Zeitraum 2068 – 2097 sich die IHK-Wärme-TAM im Mittel in Deutschland fast verdoppelt und eine um 5,4 % (Mortalität im Referenzzeitraum plus 2,4 %) erhöhte IHK-Mortalität aufgrund von warmen und heißen Tagen herrscht. Chen et al. (2019) haben ein ähnliches Ergebnis für Augsburg im Zeitraum 1987 – 2014 beobachtet, mit einem Anstieg des hitzebedingten RR (tödlicher und nicht-tödlicher) Myokardinfarkte zwischen 1987 und 2014 von 0,93 auf 1,14, während keine signifikante Abnahme der kältebedingten Fallzahlen gefunden werden konnte.

Im Vergleich zu den TAM-Werten der CLRD-Mortalität sind sowohl die IHK-TAM-Werte im Referenzzeitraum als auch die Zunahmen bis Ende des Jahrhunderts nur etwas mehr als halb so hoch. Damit bestätigt sich das Ergebnis, dass die CLRD-Mortalität stärker von Wärme und Hitze betroffen ist als die IHK-Mortalität.

Die TAM-Werte der vorliegenden Untersuchung für Deutschland gelten hier als Flächenmittelwert. Werden die einzelnen Regionen betrachtet, sind die TAM-Werte im Referenzzeitraum meist deutlich höher. So beträgt die CLRD-Wärme-TAM in der Region Mitte beispielsweise 10,8 %, was fast das Doppelte zum Deutschlandmittelwert von 5,9 % ist, auch die Regionen West und Ost sind deutlich stärker betroffen. Ein Grund dafür liegt in dem etwas häufigeren Auftreten von Tagen mit einer Lufttemperatur oberhalb des Schwellenwertes in diesen betroffenen Regionen im Referenzzeitraum im Vergleich zum Deutschland-Mittelwert, auch Tage mit extremen Lufttemperaturwerten treten in diesen Regionen etwas häufiger auf. Der Anstieg der regionalen TAM-Werte in den beiden RCP-Szenarien liegt jedoch meist in einem ähnlichen Wertebereich wie im Deutschlandmittel. Die regionalen Ergebnisse sind unter der Berücksichtigung der klimatischen Unterschiede innerhalb Deutschlands für die Interpretation sowohl der aktuellen als auch zukünftigen Belastung zu bevorzugen. Die Analysen mit dem Flächenmittelwert für Deutschland dienen vor allem der Übersichtlichkeit und dem Vergleich zwischen CLRD- und IHK-Mortalität.

Im Vergleich zur **Vorläuferstudie** weisen die hier gefunden Werte der TAM für die IHK-Mortalität sowohl für die Gegenwart (Referenzzeitraum) als auch für die Zukunft eine etwas geringere Belastung aufgrund der Temperatur auf. Für die IHK-Mortalität gibt die Vorläuferstudie eine TAM des gesamten Temperaturbereiches im Mittel für Deutschland für den Zeitraum 1971 – 2000 von 0,9 % an (Zacharias und Koppe 2014), was deutlich höher liegt als der Wert der vorliegenden Untersuchung von 0,1 % für die Jahre 1981 – 2010. Die Zunahme der TAM bis 2021 – 2050 um 0,3 % und bis 2069 – 2098 um zusätzlich 1,1 % ist ebenfalls stärker als mit den RCP-Szenarien, die einen Anstieg von 0,1 % bis 2021 – 2050 angeben (beide RCP-Szenarien) und bis 2068 – 2097 einen Anstieg von 0,3 % (RCP4.5) bzw. 0,8 % (RCP8.5). Dieser Unterschied kann

mehrere Ursachen haben. Die Beziehung der IHK-Mortalität zum Temperaturspektrum (Kurve des RR) ist ähnlich zwischen den beiden Untersuchungen. Die Verwendung dieser Beziehung für die Berechnung der TAM weist jedoch Unterschiede auf. So verwendet die Vorläuferstudie lineare Regressionen, um die Entwicklung des Relativen Risikos unterhalb und oberhalb der Schwellenwerte zu beschreiben. Dies unterscheidet sich zur vorliegenden Untersuchung, in der für alle beobachteten Temperaturklassen das tatsächlich beobachtete Risiko verwendet wurde und für die Extremwerte eine gleichbleibende Fortschreibung. Eine lineare Annäherung wurde aufgrund des eindeutig nicht linearen, sondern eher exponentiellen Zusammenhangs zwischen Mortalität und steigenden Temperaturwerten nicht in Betracht gezogen. Damit lässt sich ein weiterer Teil der Unterschiede neben den verschiedenen Datensätzen erklären.

Für die Auswertung der TAM in der vorliegenden Untersuchung mussten einige Annahmen getroffen werden, die im Folgenden diskutiert werden:

- ▶ Die Belastung aufgrund von sehr hohen Lufttemperaturwerten kann in der vorliegenden Untersuchung unterschätzt werden, da mit der Fortschreibung der Relativen Risiken für extreme Temperaturklassen, die in der retrospektiven Analyse (2001 – 2015) nicht beobachtet wurden, eine eher konservative Abschätzung Mortalitätsrisikos gewählt wurde. Die Analyse eines weiteren Anstiegs des Relativen Risiko an Tagen mit extrem hoher T_a ist wahrscheinlich, bedarf aber der Entwicklung eines Modells, was in dieser Untersuchung nicht erfolgt ist.
- ▶ Weitere Unsicherheiten, wie soziale und demographische Änderungen in der Zukunft könnten darüber hinaus zu einem zusätzlichen Ansteigen der Mortalität aufgrund von Hitze führen (Huang et al. 2011). So kann eine zunehmend alternde Gesellschaft eine weiter ansteigende Mortalität in der Zukunft bedeuten, da Ältere eine der Hauptrisikogruppen bei Hitzeperioden sind (Bunker et al. 2016). Ein weiteres Beispiel ist eine zunehmende Urbanisierung, wodurch immer mehr Menschen zusätzlichem Hitzestress aufgrund einer städtischen Wärmeinsel (urban heat island effect) ausgesetzt sind (Boeckmann und Rohn 2014; Hondula et al. 2015) und verstärkt unter schlechter Luftqualität leiden, was die Mortalität aufgrund von Hitze weiter verstärken könnte (Matzarakis und Endler 2010; Huang et al. 2011; Matzarakis 2013). Inwieweit sich die Urbanisierung in Deutschland entwickeln und zur zukünftigen hitzebedingten Mortalität beitragen wird, ist jedoch aufgrund verschiedener Trends der Bevölkerungsentwicklung nicht eindeutig (GmbH 2018; Wolff et al. 2020).

Die Aussagen über die Entwicklung des zukünftigen Klimas und die daraus entstehende gesundheitliche Belastung des Menschen sind mit Unsicherheiten belegt. Zwei generelle Unsicherheitsbereiche wurden in dieser Untersuchung bereits berücksichtigt (Gosling et al. 2012; Gosling et al. 2017; Petkova et al. 2017):

1. Mit der Verwendung von Ensembledaten wurde die Unsicherheit der verschiedenen Klimamodelle abgeschätzt.
2. Die Ergebnisse auf Basis zwei verschiedener Klimaszenarien zeigen eine Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen des Klimas auf.

Eine Berücksichtigung von Adaptionsprozessen der Menschen und der Gesellschaft an die sich ändernden klimatischen Bedingungen ist jedoch nicht erfolgt, welches einen dritten wichtigen Unsicherheitsbereich darstellt. Zu den Adaptionsprozessen gehören unter anderem geplante technologische oder infrastrukturelle Anpassungen, Verhaltensanpassungen wie eine leichtere Kleidung im Sommer und physiologische Anpassungen des Körpers an ein wärmeres Klima (z. B. McMichael et al. 2006; Huang et al. 2011; Huynen und Martens 2015; Hondula et al. 2015; Gosling et al. 2017). Eine physiologische Anpassung (Akklimation) führt zu einer geringer

werdende Sensitivität gegenüber wärmeren Temperaturwerten (Hondula et al. 2015), die Größenordnung dieser Abnahme, Limitierungen sowie räumliche und zeitliche Änderungen sind jedoch unklar (Boeckmann und Rohn 2014; Hondula et al. 2015; Gosling et al. 2017). Die Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen aufgrund der Anpassung des Menschen wird als ähnlich groß eingeschätzt wie die von den Klimamodellen und –szenarien (Gosling et al. 2017). In der Literatur sind Vorschläge vorhanden, wie eine solche Anpassung in die Berechnungen mit integriert werden kann (Gosling et al. 2017). Durch die Berücksichtigung einer Anpassung könnten die Effekte des Klimawandels abgeschwächt werden und damit geringer sein als bei der Annahme einer konstanten Beziehung zwischen Temperatur und Mortalität. Dieser Aspekt könnte in einer möglichen weiterführenden Studie untersucht werden.

6.5 Auswirkungen zukünftiger Hitzeperioden

Bei der Betrachtung zukünftiger Hitzeperioden in Deutschland als Flächenmittelwert muss beachtet werden, dass gemittelte Werte für ganz Deutschland nur eingeschränkt die Belastungen in den einzelnen Regionen wiedergeben können. Im speziellen, da hier für eine Hitzewelle, die über den Deutschlandmittelwert der Lufttemperatur gefunden wurde, alle Mortalitätsdaten in die Analyse miteinbezogen werden. Eine höhere Genauigkeit kann daher bei den regionalen Auswertungen erwartet werden. Da die regionalen Hitzeperioden mit einem entsprechenden regionalen Perzentil definiert werden, sind methodisch bedingt wenig regionale Unterschiede im Referenzzeitraum zu erkennen. Die Veränderung der Hitzewellen in ihrer Häufigkeit, Dauer und Intensität im Zuge des Klimawandels zeigt aber regionale Unterschiede auf. So ist sowohl in den Ergebnissen für die regionalen Flächenmittelwerte als auch in den Ergebnissen der Rasterdaten zu erkennen, dass sich vor allem der Süden, die Mitte und teilweise der Westen Deutschlands stärker erwärmt (die Intensität der Hitzewellen nimmt zu) und die Häufigkeit der Hitzewellen und Hitzewellentage verstärkt zunimmt. Vor allem der Alpenraum zeigt eine starke Zunahme an Hitzewellen und der Intensität am Ende des Jahrhunderts. Bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts wurde im Alpenraum eine deutlich stärkere Erwärmung im Vergleich zum globalen Durchschnitt verzeichnet (Brunetti et al. 2009). Weitere Untersuchungen mit den EURO-CORDEX und HYRAS-Daten zeigen, dass sich dieser Trend mit den RCP-Szenarien auch im direkten Vergleich zum mitteleuropäischen Durchschnitt (Kjellström et al. 2018) und zu Regionen innerhalb Deutschlands (Brienen et al. 2020) bis Ende des 21. Jahrhunderts fortsetzen wird. Die regional auffällig starke Erwärmung der deutschen Ostseeküstengebiete, die sich in den Rasterdaten vor allem bei der Dauer der Hitzewellen zeigt, lässt sich nicht vollständig erklären, scheint aber eine Gemeinsamkeit einiger globalen Klimamodelle (GCMs) zu sein, die für die Ensembledaten verwendet wurden (Kjellström et al. 2018).

Anhand der hohen regionalen Auflösung der Rasterdaten von 5x5 km können mesoskalige meteorologische Prozesse eher abgebildet und die Simulation von Hitzewellen gegenüber größeren Auflösungen verbessert werden (Vautard et al. 2013).

Die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Ensembledaten geben für den Referenzzeitraum eine mittlere Anzahl von 13 Hitzewellen-Tagen an (Deutschlandmittelwert). Für die nahe Zukunft (2021 – 2050) konnte eine mittlere Anzahl von 22 – 23 Hitzewellentagen (HW) bestimmt werden, wobei hier beide RCP-Szenarien sehr ähnliche Ergebnisse zeigen. In der fernen Zukunft (2068 – 2097) ist der Unterschied zwischen den RCP-Szenarien sehr deutlich, da hier die Zahl der HW-Tage auf 31 (RCP4.5) oder sogar auf 54 Tage (RCP8.5) ansteigt. Hajat et al. (2014) haben eine mehr als Verdreifachung der Hitze-Tage ($T_a > 93$. Perzentil) zwischen den 2000er und den 2080er Jahren festgestellt (SRES A1b-Szenario), was die gut in die hier gefundenen Ergebnisse einreicht. Die Anzahl der Hitzewellen/Jahr steigt in der vorliegenden Untersuchung mit dem RCP8.5-Szenario um 1,3 bzw. 3,7 Episoden (2021 – 2050 bzw. 2968 – 2097), die

Dauer der Hitzewellen auf 6,2 bzw. 8,7 Tage, die durchschnittliche Intensität steigt auf 22,3 – 23,2 °C (RCP8.5, 2021 – 2050 bzw. 2968 – 2097). Wu et al. (2014) geben für den Osten der USA eine Anzahl der Hitzewellen/Jahr von 2,4 Episoden und eine Dauer von 4,9 Tagen für den Zeitraum 2057 – 2059 an. Die Intensität wird für diesen Zeitraum und Szenario mit 25,4 °C angegeben (Wu et al. 2014).

Die Zunahme innerhalb des RCP4.5-Szenarios bleibt also zwischen dem Referenzzeitraum, der nahen und der fernen Zukunft annähernd konstant, während das RCP8.5-Szenario vor allem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen eher exponentiellen Anstieg beschreibt. Im Vergleich der beiden RCP-Szenarien muss beachtet werden, dass die Ensembledaten aus einer unterschiedlichen Anzahl an einzelnen Mitgliedern bestehen (RCP4.5 mit 12 Mitgliedern, RCP8.5 mit 21 Mitgliedern). Gleiches gilt für den Vergleich der beiden Zukunftszeiträume mit dem Referenzzeitraum, da die Werte für diesen mit einem aus den historischen Verläufen beider Szenarien bestehenden Ensemble (33 Member) berechnet werden. Je höher die Anzahl an Mitgliedern in einem Ensemble, desto weniger tragen die Unsicherheiten der einzelnen Modellläufe zu dem Ergebnis bei.

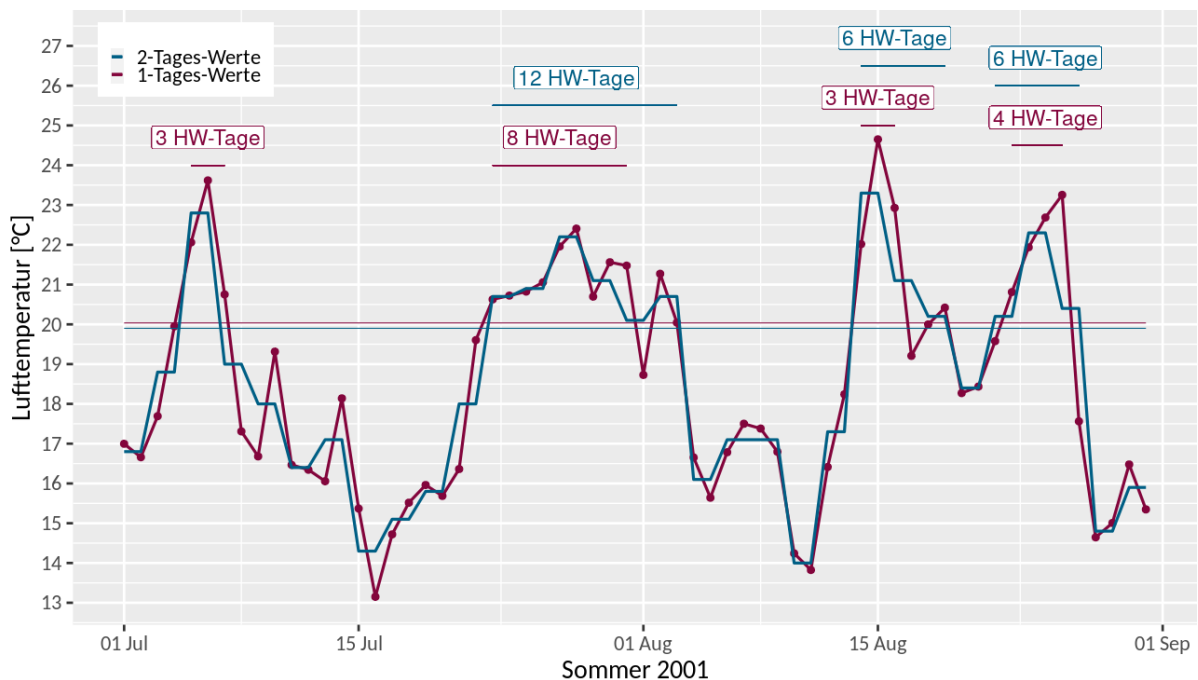
Der Vergleich der Analysen der Hitzeperioden mit der **Vorläuferstudie** zeigt in beiden Untersuchungen eine gute Übereinstimmung im historischen Zeitraum. Die Unterschiede in der Zukunft lassen sich durch die verwendeten Klimaszenarien erklären (SRES-A1B Szenario im Vergleich zu den RCP-Szenarien). Die Anzahl der Hitzewellentage wird in der Vorläuferstudie für 1971 – 2000 mit 12,5 angegeben, was etwas geringer ist als die 13,0 HW-Tage, die in dieser Untersuchung für 1981 – 2010 ermittelt wurden. Für die nahe Zukunft (2021 – 2050) gibt die Vorläuferstudie 19,7 HW-Tage und für die ferne Zukunft (2069 – 2098) 38,6 HW-Tage an (Zacharias und Koppe 2015). Diese Werte liegen für die nahe Zukunft etwas niedriger als die der beiden RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 (22 bzw. 23 Tage), für die ferne Zukunft liegt der Wert zwischen diesen beiden RCP-Szenarien (31 bzw. 54 Tage), was dem SRES-Szenario A1B entspricht (IPCC 2013). Auch die mittlere Anzahl der Hitzewellen zeigt bei den beiden Untersuchungen eine gute Übereinstimmung bzw. die Unterschiede können anhand der verwendeten Szenarien erklärt werden. So gibt die Vorläuferstudie diese Anzahl mit 2,3 für 1971 – 2000 an was zur Anzahl von 2,5 für 1981 – 2010 passend erscheint. Für die nahe Zukunft werden von der Vorläuferstudie 3,3 Hitzewellen erwartet (3,8 mit beiden RCP-Szenarien) und für die ferne Zukunft 5,4 (4,4 bzw. 6,2 mit RCP4.5 bzw. 8.5). Für die Dauer der Hitzewellen gibt die Vorläuferstudie historisch (1971 – 2000) 5,3 Tage an, dieser Wert liegt geringfügig höher im Vergleich zu 5,2 Tagen dieser Untersuchung für 1981 – 2010. Für die nahe Zukunft wird die Dauer mit 5,8 Tagen (6,1 bzw. 6,2 Tage RCP4.5 bzw. RCP8.5) und für die ferne Zukunft mit 7,1 Tagen für Deutschland angegeben (6,9 bzw. 8,7 Tage mit RCP4.5 bzw. RCP8.5). Die Unterschiede in der Zukunft können wiederum auf die verwendeten Szenarien zurückgeführt werden.

Die Charakteristiken der Hitzewellen, ihre Anzahl, Dauer und Intensität sowie ihr Auftreten in der Saison sind für die Abschätzung der gesundheitlichen Belastung während und nach Hitzewellen relevant (Anderson und Bell 2011). Vor allem die Dauer der Hitzewelle kann die Mortalität verstärken (z. B. Koppe und Jendritzky 2005; Matzarakis et al. 2011) und die überproportionale Zunahme langer Hitzewellen kann daher zu einer stark ansteigenden Zahl von Todesfällen während Hitzewellen führen. So geben beide RCP-Szenarien einen Anstieg der CLRD-Mortalität während langer Hitzewellen von bis zu 150 % bis zur Mitte des Jahrhunderts und 260 % (RCP4.5) bis maximal 540 % (RCP8.5) Zunahme am Ende des Jahrhunderts. Die IHK-Mortalität könnte demnach 2021 – 2050 um 90 % bzw. 150 % (RCP4.5 bzw. RCP8.5) höher liegen, 2068 – 2097 sogar um 330 % (RCP4.5) bis maximal 900 % (RCP8.5). Die hohen Prozentzahlen ergeben sich durch die Änderung eines relativ kleinen Nenners, hier die Anzahl der HW-Tage

während langer Hitzewellen von historisch 2,7 Tagen auf 27,5 Tage Ende des Jahrhunderts, verrechnet mit einer erhöhten Mortalität von 13,6 % pro Tag einer langen Hitzewelle. Analog zur Auswertung der TAM wurde hier ebenfalls keine Anpassungseffekte des Menschen und der Gesellschaft berücksichtigt. Hajat et al. (2014) geben für England und Wales eine Zunahme der hitzebedingten Gesamtmortalität von 169 % bis in die 2050er Jahre und von 329 % bis zu den 2080er Jahren unter dem SRES-Szenario A1B an. Ein zusätzlicher signifikanter Effekt von Hitzewellen konnte für London gefunden werden mit einem zusätzlichen Anstieg von 70 % bzw. 78 % der hitzebedingten Mortalität für die 2050er bzw. 2080er Jahre. (Peng et al. 2011) geben eine Zunahme der Gesamtmortalität während Hitzewellen von 313 % bis 4 183 % pro Jahr (Zunahme der Todesfälle von durchschnittlich 53 auf 166 bis 2 217 während Hitzewellen) je nach SRES-Szenario an.

Der Grund für die stärkere Zunahme der IHK-Mortalität während Hitzewellen im Vergleich zur CLRD-Mortalität liegt in der unterschiedlichen Definition der Hitzewellen je nach zeitlicher Auflösung der Mortalitätsdaten (1-Tages- oder 2-Tages-Werte). Im Referenzzeitraum zeigt sich in der mittleren Anzahl der Hitzewellentage innerhalb der langen Hitzewellen ein deutlicher Unterschied zwischen 4,7 Tagen (Hitzewellen mit 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur) und 2,7 Tagen (Hitzewellen mit 1-Tages-Werten). Dagegen sind in der Kategorie der kurzen und mittleren Hitzewellen weniger Hitzewellentage vorhanden, als mit den 1-Tages-Werten. Durch die Berechnung der Hitzewellen mit 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur dauern die Hitzewellen tendenziell etwas länger und können kurzfristige Schwankungen der Lufttemperatur „überbrücken“. Dadurch verschiebt sich die Anzahl der Hitzewellentage von den kurzen Hitzewellen eher in die mittlere und lange Kategorie. Dies ist an einem Beispiel im Sommer 2001 für den Deutschlandmittelwert sichtbar (Abbildung 52).

Abbildung 52: Unterschied der Hitzewellendauer je nach Definition mit 1-Tages- oder 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur im Sommer 2001 für den Deutschlandmittelwert.



Erläuterungen: Die horizontale Linie entspricht dem 95. Perzentil der Lufttemperatur im jeweiligen Datensatz, HW, Hitzewelle. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

In beiden Fällen steigt die Anzahl der Hitzewellentage bis Ende des Jahrhunderts jedoch auf annähernd ähnliche Werte (Deutschlandmittelwert von 30 Tagen bzw. 27 Tagen im RCP8.5-Szenario). Im Vergleich zum Referenzzeitraum fällt der prozentuale Anstieg der IHK-Mortalität dadurch deutlich stärker aus als bei der CLRD-Mortalität, was aber nicht als eine geringere Vulnerabilität der CLRD-betroffenen Personen gegenüber Hitze interpretiert werden kann.

Bei der Abschätzung des Effektes der Hitzewellen auf die Mortalität in der Zukunft wurden einige Annahmen getroffen, die ebenfalls kritisch diskutiert werden:

- ▶ Auch hier gilt die Annahme der gleichbleibenden Beziehung zwischen Mortalität und Hitzeperioden, so wie sie in der retrospektiven Analyse beobachtet wurde. Zukünftige gesellschaftliche Veränderungen, die oben bereits diskutiert wurden, werden dabei nicht berücksichtigt. Dies führt dazu, dass der Anstieg der Mortalität vor allem während langer Hitzewellen vermutlich überschätzt wird.
- ▶ Nicht nur die Dauer, sondern auch die Intensität spielt eine Rolle bei der gesundheitlichen Belastung durch Hitzeperioden. Je heißer und feuchter die Luft ist, desto belastender für den Körper (z.B. Muthers et al. 2017). Der Einfluss der Intensität und des Auftretens der Hitzewelle innerhalb der Saison auf die Mortalität wurde in der retrospektiven Analyse nicht untersucht und konnte daher in diesem Studienteil nicht für die Zukunft abgeschätzt werden.

Ein mögliches Absinken der Mortalität unter den Erwartungswert nach einer Hitzewelle als Reaktion auf die erhöhte Mortalität während der Hitzewelle („displacement“-Effekt) könnte die projizierte zukünftige hitzewellenbedingte Mortalität reduzieren, wurde in der retrospektiven Analyse jedoch nicht beobachtet, was sich auch mit der Literatur deckt (Hoffmann et al. 2008; Basu und Malig 2011; Muthers et al. 2017).

6.6 Pollenanalyse

Die Analyse der Pollenbelastung in fünf Regionen in Deutschland hat gezeigt, dass sowohl Birkenpollen als auch Gräserpollen einen Risikofaktor darstellen können, aufgrund der Diagnose Asthma bronchiale oder Status asthmaticus in ein Krankenhaus aufgenommen werden zu müssen. Je nach gewähltem Grenzwert der Pollenanzahl und der Berücksichtigung eines eintägigen Lag-Effektes ist das Risiko einer Krankenhausaufnahme an Tagen mit hoher Pollenbelastung um das 2- bis 3-fache erhöht.

Die Saison der Birkenpollen dauert im Durchschnitt ca. 22 bis 25 Tage und liegt hauptsächlich im April. Innerhalb dieser kurzen Zeit kann die Pollenkonzentration sehr stark ansteigen, der Anstieg variiert aber stark zwischen den Regionen, was einen Vergleich erschwert. Zusätzlich führt die Wahl eines einheitlichen Grenzwertes für alle Regionen zu teilweise schwierigen Verhältnissen innerhalb der Kontingenztabelle. Dies tritt auf, wenn z. B. durch einen zu niedrigen Schwellenwert nahezu alle Tage der Saison über diesem Grenzwert liegen oder aber der umgekehrte Fall vorliegt. Daher wurden neben den festen Grenzwerten auch variable Grenzwerte mittels des 50. Perzentils der jeweiligen Pollenkonzentration verwendet. Die Wahl des 50. Perzentils sollte eine ausgewogene Aufteilung der Tage mit hoher und geringer Pollenbelastung innerhalb der Saison gewährleisten. Da das 50. Perzentil der Birkenpollen in den meisten Regionen bereits deutlich höher liegt als die festen Grenzwerte, wurde auf die Auswertung höherer Perzentile verzichtet. Eine hohe Belastung durch Birkenpollen innerhalb der Birkenpollensaison hat sich im Zusammenhang mit Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma-Symptomen als signifikanter Risikofaktor herausgestellt. Dies gilt vor allem in den Regionen West, Süd-West und Süd-Ost.

Die Saison der Gräserpollen ist im Vergleich zur Saison der Birkenpollen deutlich länger, im Durchschnitt dauert diese 77 bis 95 Tage und streckt sich von Mai bis Anfang August. Die Konzentration der Gräserpollen erreicht innerhalb dieses Zeitraumes jedoch nur ca. 114 bis 254 P / m³ (Median der Maxima). Im Zusammenhang mit Krankenhausaufnahmen aufgrund von Asthma-Symptomen stellten sich Tage mit einer hohen Gräserpollenkonzentration als signifikanter Risikofaktor heraus. Dies gilt jedoch nur in den Regionen West und Süd-West, für die anderen Regionen konnte kein signifikantes Ergebnis gefunden werden. Die Berücksichtigung eines Lag-Effektes von einem Tag zeigt keinen eindeutigen Trend in den Ergebnissen.

Eine weitere Analyse der gesundheitlichen Belastung von Pollenallergenen wurde explorativ zusätzlich mit Krankenhausaufnahmen aufgrund der Diagnose „vasomotorische und allergische Rhinopathie“ (ICD-10-Code J30) durchgeführt, welche einen Fließschnupfen aufgrund einer Pollenallergie, also Heuschnupfen und Heufieber beinhaltet. Es wurde ein signifikantes Risiko aufgrund von Gräserpollen in allen Regionen außer Region Ost gefunden. Tage mit erhöhter Birkenpollenkonzentration zeigte keinen signifikanten Zusammenhang mit J30-Fällen im Krankenhaus. Die Datengrundlage dieser Krankenhausaufnahmen war allerdings so gering, dass nur eine Unterscheidung zwischen Tagen mit Fällen und Tagen ohne Fälle möglich war (Erkrankte ja/nein). Dies führt zu einer geringen Aussagekraft der Ergebnisse. Allergische Reaktionen auf Pollenallergene sind nur in seltenen Fällen gesundheitlich so gefährdend, dass eine Krankenhausaufnahme mit der Diagnose J30 erfolgt. Schwerwiegendere Fälle von allergisch bedingten Atembeschwerden könnten wiederum mit einem anderen ICD-10-Code als J30, z. B. mit J45 (Asthma bronchiale inklusive allergische Rhinopathie mit Asthma) diagnostiziert werden. Die Verwendung der Krankenhausaufnahmen ist dementsprechend für eine Analyse von Zusammenhängen mit klassischem Heuschnupfen nicht zielführend. Ambulante Daten der Hausärzte, Apotheken oder Daten von Symptomtagebüchern wären aufgrund ihrer höheren Anzahl, Auflösung und Nähe zu den Erkrankten vor allem von Heuschnupfen besser geeignet (z. B. Bastl et al. 2014; Bastl et al. 2018a; Werchan et al. 2018).

Die Regionen umfassen räumlich große Gebiete mit unterschiedlicher Landnutzung, Vegetation und Bevölkerungsdichte. Die eine, jeweils pro Region, ausgewählte Station der Pollenerfassung kann diese Vielfalt und dadurch entstehende unterschiedliche Belastung mit Pollen nur bedingt darstellen. Aufgrund der geringen Datengrundlage der Morbiditätsdaten konnte keine höhere räumliche Auflösung untersucht werden.

Die Pollenproduktion und -konzentration in der Luft ist abhängig von meteorologischen Bedingungen wie dem Anstieg der Lufttemperatur im Frühling, der Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Es besteht zwar ein Zusammenhang zwischen Pollenkonzentration und der Schwere der Symptomatik, dennoch müssen sie nicht zwangsläufig stark korrelieren (Bastl et al. 2014). Entscheidender ist der Allergengehalt der Pollen, der sogar von Tag zu Tag variieren kann (Buters et al. 2012; D'Amato et al. 2015). Welche meteorologischen Faktoren und andere Umwelteinflüsse die Allergenproduktion und den Allergengehalt steuern ist noch unklar (D'Amato et al. 2015). Es gibt Hinweise darauf, dass Luftverunreinigungen wie Stickstoffoxide, bodennahe Ozon und Feinstaub alleine und im Zusammenhang mit Pollen ebenfalls mit vermehrten Asthma-Anfällen assoziiert sind (z. B. Darrow et al. 2012). So können Luftschadstoffe die Oberflächen von Pollen verändern und dadurch die Freisetzung von Pollen begünstigen sowie das Allergiepotential von Pollen erhöhen (Traidl-Hoffmann 2017). Diese Faktoren sind bei der hier gewählten Methodik nicht berücksichtigt und könnten bei einer weiterführenden Analyse in Betracht gezogen werden.

7 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie konnte für den Zeitraum 2001 – 2015 einen Einfluss der thermischen Umwelt auf die Mortalität und Morbidität von akuten Infektionen und chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege in Deutschland belegen. Bei der Mortalität ergibt sich ein stark ansteigendes Risiko mit zunehmenden Werten der Tagesmittellufttemperatur, mit abnehmender Lufttemperatur steigt das Risiko nur schwach an. Bei der Morbidität ist das Risiko unter warmen und heißen Wetterbedingungen ebenfalls stark erhöht, das Risiko im kalten Bereich ist jedoch reduziert. Ein Grund dafür kann in den gewählten ICD-Diagnosen liegen, die nur einige der Erkrankungen der unteren Atemwege abbilden und nicht Infektionen wie Erkältungen, Grippe und Lungenentzündungen abdecken. Auch für die Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen konnte ein eindeutiger Zusammenhang mit den thermischen Umweltbedingungen gefunden werden. Das Risiko für solche Todesfälle an Tagen mit hohen Lufttemperaturmittelwerten und während Hitzeperioden ist ebenfalls stark ausgeprägt, fällt aber schwächer aus als bei der atemwegsbedingten Mortalität.

Menschen mit chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege leiden daher stärker unter hohen Temperaturen und während Hitzewellen. Dies hebt die Bedeutung der chronischen Atemwegserkrankungen bei Präventionsmaßnahmen und Aufklärung hervor.

Für die Morbidität ergab sich kein gesicherter Zusammenhang mit dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur. Trotz möglicher Erklärungen aufgrund der Datenerhebung und Methodik bleiben die genauen Gründe für den fehlenden Zusammenhang noch offen. Todesfälle aufgrund von vorsätzlicher Selbstbeschädigung (Suizide) weisen nur einen schwachen Zusammenhang mit der Lufttemperatur auf, ein signifikanter Zusammenhang mit der Sonnenscheindauer, im Gegensatz zur Literatur, konnte nicht gefunden werden. Krankenhausaufnahmen mit den untersuchten psychischen und Verhaltensstörungen lassen sich ebenfalls in keinen Zusammenhang mit der Lufttemperatur bringen. Dies kann daran liegen, dass solche Erkrankungen in der Mehrzahl der Fälle zu einer ambulanten Behandlungsnotwendigkeit führen, die aber in dieser Studie nicht untersucht wurde. Eine andere Datengrundlage (Arztbesuche, Konsultationen von Psychotherapiepraxen, Stimmungstagebücher) sind zur Analyse dieser Morbidität zu bevorzugen. Daraus ergibt sich ein weiterer Forschungsbedarf in der Anwendung anderer Datengrundlagen oder Auswertemethoden.

Die Verknüpfung der Ergebnisse der retrospektiven Analyse mit den beiden RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 zur zukünftigen klimatischen Entwicklung in Deutschland zeigt, dass der Klimawandel in Deutschland mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem deutlichen Anstieg der hitzebedingten Mortalität führen wird. Die Ergebnisse dieser Studie betonen daher den Bedarf einer weiteren Verstärkung von Klimaschutzmaßnahmen und deutlichen Reduktion von Treibhausgasemissionen, damit eine Entwicklung wie in RCP8.5-Szenario berechnet vermieden werden kann. Aber auch im Fall eines weniger stark ausgeprägten Anstiegs der Treibhausgaskonzentrationen (RCP4.5) sind die gesundheitlichen Folgen beachtlich. Neben der Vermeidung eines sich verstärkenden Klimawandels müssen deswegen auch die Anpassungsmaßnahmen und -kapazitäten intensiviert werden.

Die beiden verwendeten Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) spiegeln die mögliche Bandbreite der klimatischen Entwicklung wider. Die Unsicherheiten in der Modellierung wurden durch die Verwendung eines großen Ensembles aus regionalen Klimamodellen abgeschätzt. Die zukünftige Entwicklung der Mortalität von chronischen Atemwegserkrankungen (CLRD) und ischämischen Herzerkrankungen (IHK) wird jedoch auch von weiteren Faktoren wie physiologische, soziale, demographische und ökonomische Veränderungen beeinflusst. Diese Faktoren bestimmen, in wie weit sich eine Gesellschaft an sich verändernde klimatische Bedingungen anpassen kann.

Anpassungseffekte wurden in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt und durch die vereinfachte Annahme, dass die Bedingungen der Gegenwart auch in der Zukunft Bestand haben, ersetzt. Diese Annahme ist sicherlich als konservativ zu betrachten und die angegebenen Mortalitätsabschätzungen für die Zukunft müssen vor dem Hintergrund dieser Annahme interpretiert werden. Ein weiterführender Forschungsbedarf könnte in der Erarbeitung und Anwendung einer geeigneten Methode liegen, welcher Anpassungseffekte an Klimawandelfolgen berücksichtigt.

8 Quellenverzeichnis

- Achilleos, S.; Kioumourtzoglou, M.-A.; Wu, C.-D.; Schwartz, J. D.; Koutrakis, P. und Papatheodorou, S. I. 2017. 'Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: A systematic review and meta-regression analysis', *Environment International*, 109: 89-100.
- Ajdacic-Gross, V.; Lauber, C.; Sansossio, R.; Bopp, M.; Eich, D.; Gostynski, M.; Gutzwiller, F. und Rossler, W. 2006. 'Seasonal Associations between Weather Conditions and Suicide-- Evidence against a Classic Hypothesis', *American journal of epidemiology*, 165: 561-69.
- Alessandrini, E.; Zauli Sajani, S.; Scotto, F.; Miglio, R.; Marchesi, S. und Lauriola, P. 2011. 'Emergency ambulance dispatches and apparent temperature: a time series analysis in Emilia-Romagna, Italy', *Environ Res*, 111: 1192-200.
- Almagro, P.; Hernandez, C.; Martinez-Cambor, P.; Tresserras, R. und Escarrabill, J. 2015. 'Seasonality, ambient temperatures and hospitalizations for acute exacerbation of COPD: a population-based study in a metropolitan area', *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*, 10: 899-908.
- Almeida, S.; Casimiro, E. und Analitis, A. 2013. 'Short-term effects of summer temperatures on mortality in Portugal: a time-series analysis', *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76: 422-28.
- Alves, C. A. und Ferraz, C. A. 2005. 'Effects of air pollution on emergency admissions for chronic obstructive pulmonary diseases in Oporto, Portugal', *International Journal of Environment and Pollution*, 23: 42-64.
- Analitis, A.; Katsouyanni, K.; Biggeri, A.; Baccini, M.; Forsberg, B.; Bisanti, L.; Kirchmayer, U.; Ballester, F.; Cadum, E. und Goodman, P. 2008. 'Effects of cold weather on mortality: results from 15 European cities within the PHEWE project', *American journal of epidemiology*, 168: 1397-408.
- Anderson, G. B. und Bell, M. L. 2011. 'Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 US communities', *Environmental Health Perspectives*, 119: 210-18.
- Anderson, G. B.; Dominici, F.; Wang, Y.; McCormack, M. C.; Bell, M. L. und Peng, R. D. 2013. 'Heat-related emergency hospitalizations for respiratory diseases in the Medicare population', *American journal of respiratory and critical care medicine*, 187: 1098-103.
- Andrew, E.; Nehme, Z.; Bernard, S.; Abramson, M. J.; Newbigin, E.; Piper, B.; Dunlop, J.; Holman, P. und Smith, K. 2017. 'Stormy weather: a retrospective analysis of demand for emergency medical services during epidemic thunderstorm asthma', *bmj*, 359: j5636.

- Arbuthnott, K. G. und Hajat, S. 2017. 'The health effects of hotter summers and heat waves in the population of the United Kingdom: a review of the evidence', *Environ Health*, 16: 119-19.
- Ayres-Sampaio, D.; Teodoro, A. C.; Sillero, N.; Santos, C.; Fonseca, J. und Freitas, A. 2014. 'An investigation of the environmental determinants of asthma hospitalizations: An applied spatial approach', *Applied Geography*, 47: 10-19.
- Baccini, M.; Biggeri, A.; Accetta, G.; Kosatsky, T.; Katsouyanni, K.; Analitis, A.; Anderson, H. R.; Bisanti, L.; D'ippoliti, D. und Danova, J. 2008. 'Heat effects on mortality in 15 European cities', *Epidemiology*: 711-19.
- Bakian, A. V.; Huber, R. S.; Coon, H.; Gray, D.; Wilson, P.; McMahon, W. M. und Renshaw, P. F. 2015. 'Acute Air Pollution Exposure and Risk of Suicide Completion', *American journal of epidemiology*, 181: 295-303.
- Barnett, A. G.; Williams, G. M.; Schwartz, J.; Neller, A. H.; Best, T. L.; Petroeschevsky, A. L. und Simpson, R. W. 2005. 'Air pollution and child respiratory health: a case-crossover study in Australia and New Zealand', *Am J Respir Crit Care Med*, 171: 1272-8.
- Barreca, A. I. und Shimshack, J. P. 2012. 'Absolute humidity, temperature, and influenza mortality: 30 years of county-level evidence from the United States', *American journal of epidemiology*, 176: S114-S22.
- Bastl, K.; Kmenta, M.; Berger, M. und Berger, U. 2018a. 'The connection of pollen concentrations and crowd-sourced symptom data: new insights from daily and seasonal symptom load index data from 2013 to 2017 in Vienna', *World Allergy Organization Journal*, 11: 1-8.
- Bastl, K.; Kmenta, M. und Berger, U. 2018b. 'Defining pollen seasons: background and recommendations', *Current allergy asthma reports*, 18: 73.
- Bastl, K.; Kmenta, M.; Geller-Bernstein, C.; Berger, U. und Jäger, S. 2015. 'Can we improve pollen season definitions by using the symptom load index in addition to pollen counts?', *Environmental pollution* 204: 109-16.
- Bastl, K.; Kmenta, M.; Jäger, S.; Bergmann, K.-C. und Berger, U. 2014. 'Development of a symptom load index: enabling temporal and regional pollen season comparisons and pointing out the need for personalized pollen information', *Aerobiologia*, 30: 269-80.
- Basu, R. und Malig, B. 2011. 'High ambient temperature and mortality in California: exploring the roles of age, disease, and mortality displacement', *Environ Res*, 111: 1286-92.
- Bauer, M.; Glenn, T.; Grof, P.; Rasgon, N. L.; Marsh, W.; Sagduyu, K.; Alda, M.; Murray, G.; Quiroz, D. und Malliaris, Y. 2009. 'Relationship among latitude, climate, season and self-reported mood in bipolar disorder', *Journal of Affective Disorders*, 116: 152-57.

- Bell, M. L.; McDermott, A.; Zeger, S. L.; Samet, J. M. und Dominici, F. 2004. 'Ozone and short-term mortality in 95 US urban communities, 1987-2000', *Jama*, 292: 2372-78.
- Biermann, T.; Stilianakis, N.; Bleich, S.; Thürauf, N.; Kornhuber, J. und Reulbach, U. 2009. 'The hypothesis of an impact of ozone on the occurrence of completed and attempted suicides', *Medical Hypotheses*, 72: 338-41.
- Boeckmann, M. und Rohn, I. 2014. 'Is planned adaptation to heat reducing heat-related mortality and illness? A systematic review', *BMC Public Health*, 14: 1112.
- Braga, A. L.; Zanobetti, A. und Schwartz, J. 2002. 'The effect of weather on respiratory and cardiovascular deaths in 12 U.S. cities', *Environ Health Perspect*, 110: 859-63.
- Brandl, E. J.; Lett, T. A.; Bakanidze, G.; Heinz, A.; BERPohl, F. und Schouler-Ocak, M. 2018. 'Weather conditions influence the number of psychiatric emergency room patients', *International Journal of Biometeorology*, 62: 843-50.
- Breitner, S.; Wolf, K.; Devlin, R. B.; Diaz-Sanchez, D.; Peters, A. und Schneider, A. 2014. 'Short-term effects of air temperature on mortality and effect modification by air pollution in three cities of Bavaria, Germany: A time-series analysis', *Science of The Total Environment*, 485-486: 49-61.
- Brienen, S.; Walter, A.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M.; Helms, M.; Höpp, S.; Jensen, C.; Jochumsen, K.; Möller, J.; Krähenmann, S.; Nilson, E.; Rauthe, M.; Razafimaharo, C.; Rudolph, E.; Rybka, H.; Schade, N. und Stanley, K. 2020. 'Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.': 157 S.
- Brown, H. K.; Simpson, J. A. und Murchison, J. T. 2009. 'The influence of meteorological variables on the development of deep venous thrombosis', *Thrombosis and haemostasis*, 102: 676-82.
- Brunetti, M.; Lentini, G.; Maugeri, M.; Nanni, T.; Auer, I.; Boehm, R. und Schoener, W. 2009. 'Climate variability and change in the Greater Alpine Region over the last two centuries based on multi-variable analysis', *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29: 2197-225.
- Brzezinska-Pawlowska, O. E.; Rydzewska, A. D.; Luczynska, M.; Majkowska-Wojciechowska, B.; Kowalski, M. L. und Makowska, J. S. 2016. 'Environmental factors affecting seasonality of ambulance emergency service visits for exacerbations of asthma and COPD', *J Asthma*, 53: 139-45.
- Buckley, J. P. und Richardson, D. B. 2012. 'Seasonal modification of the association between temperature and adult emergency department visits for asthma: a case-crossover study', *Environ Health*, 11: 55.

- Bulajich, B.; Subotich, D.; Mandarich, D.; Kljajich, R. V. und Gajich, M. 2005. 'Influence of atmospheric pressure, outdoor temperature, and weather phases on the onset of spontaneous pneumothorax', *Ann Epidemiol*, 15: 185-90.
- Bulbena, A.; Pailhez, G.; Acena, R.; Cunillera, J.; Rius, A.; Garcia-Ribera, C.; Gutierrez, J. und Rojo, C. 2005. 'Panic anxiety, under the weather?', *Int J Biometeorol*, 49: 238-43.
- Bullock, B.; Murray, G. und Meyer, D. 2017. 'Highs and lows, ups and downs: Meteorology and mood in bipolar disorder', *PLoS One*, 12: e0173431.
- Bunker, A.; Wildenhain, J.; Vandenbergh, A.; Henschke, N.; Rocklöv, J.; Hajat, S. und Sauerborn, R. 2016. 'Effects of air temperature on climate-sensitive mortality and morbidity outcomes in the elderly; a systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence', *EBioMedicine*, 6: 258-68.
- Bunz, M. und Mücke, H. G. 2017. '[Climate change - physical and mental consequences]', *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, 60: 632-39.
- Buters, J. T.; Thibaudon, M.; Smith, M.; Kennedy, R.; Rantio-Lehtimäki, A.; Albertini, R.; Reese, G.; Weber, B.; Galan, C. und Brandao, R. 2012. 'Release of Bet v 1 from birch pollen from 5 European countries. Results from the HIALINE study', *Atmospheric Environment*, 55: 496-505.
- Buxton, N.; Liu, C.; Dasic, D.; Moody, P. und Hope, D. T. 2001. 'Relationship of aneurysmal subarachnoid hemorrhage to changes in atmospheric pressure: results of a prospective study', *Journal of neurosurgery*, 95: 391-92.
- Byers, N.; Ritchey, M.; Vaidyanathan, A.; Brandt, A. J. und Yip, F. 2016. 'Short-term effects of ambient air pollutants on asthma-related emergency department visits in Indianapolis, Indiana, 2007-2011', *J Asthma*, 53: 245-52.
- Carder, M.; McNamee, R.; Beverland, I.; Elton, R.; Cohen, G. R.; Boyd, J. und Agius, R. M. 2005. 'The lagged effect of cold temperature and wind chill on cardiorespiratory mortality in Scotland', *Occup Environ Med*, 62: 702-10.
- Casas, L.; Cox, B.; Bauwelinck, M.; Nemery, B.; Deboosere, P. und Nawrot, T. S. 2017. 'Does air pollution trigger suicide? A case-crossover analysis of suicide deaths over the life span', *European journal of epidemiology*, 32: 973-81.
- Cassidy, F. und Carroll, B. J. 2002. 'Seasonal variation of mixed and pure episodes of bipolar disorder', *Journal of Affective Disorders*, 68: 25-31.
- Chan, M. P.; Weinhold, R. S.; Thomas, R.; Gohlke, J. M. und Portier, C. J. 2015. 'Environmental Predictors of US County Mortality Patterns on a National Basis', *PLoS One*, 10: e0137832.

- Chen, K.; Breitner, S.; Wolf, K.; Hampel, R.; Meisinger, C.; Heier, M.; von Scheidt, W.; Kuch, B.; Peters, A. und Schneider, A. 2019. 'Temporal variations in the triggering of myocardial infarction by air temperature in Augsburg, Germany, 1987–2014', *European Heart Journal*, 40: 1600-08.
- Chen, T.-H.; Li, X.; Zhao, J. und Zhang, K. 2017. 'Impacts of cold weather on all-cause and cause-specific mortality in Texas, 1990–2011', *Environmental Pollution*, 225: 244-51.
- Chen, X.; Cao, Q.; Liu, C. und Xu, C. 2008. 'Research on meteorological conditions and their related diseases in Hefei, China', *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1140: 86-90.
- Cheng, J.; Xu, Z.; Zhu, R.; Wang, X.; Jin, L.; Song, J. und Su, H. 2014. 'Impact of diurnal temperature range on human health: a systematic review', *International Journal of Biometeorology*, 58: 2011-24.
- Cheng, X. und Su, H. 2010. 'Effects of climatic temperature stress on cardiovascular diseases', *European Journal of Internal Medicine*, 21: 164-67.
- Christensen, E. M.; Larsen, J. K.; Gjerris, A.; Peacock, L.; Jacobi, M. und Hassenbalch, E. 2008. 'Climatic factors and bipolar affective disorder', *Nord J Psychiatry*, 62: 55-8.
- Claeys, M. J.; Coenen, S.; Colpaert, C.; Bilcke, J.; Beutels, P.; Wouters, K.; Legrand, V.; Van Damme, P. und Vrints, C. J. A. c. 2015. 'Environmental triggers of acute myocardial infarction: results of a nationwide multiple-factorial population study', 70: 693-701.
- Claeys, M. J.; Rajagopalan, S.; Nawrot, T. S. und Brook, R. D. 2017. 'Climate and environmental triggers of acute myocardial infarction', *European Heart Journal*, 38: 955-60.
- D'Ippoliti, D.; Michelozzi, P.; Marino, C.; de'Donato, F.; Menne, B.; Katsouyanni, K.; Kirchmayer, U.; Analitis, A.; Medina-Ramon, M.; Paldy, A.; Atkinson, R.; Kovats, S.; Bisanti, L.; Schneider, A.; Lefranc, A.; Iniguez, C. und Perucci, C. A. 2010. 'The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project', *Environ Health*, 9: 37.
- D'Amato, G.; Holgate, S. T.; Pawankar, R.; Ledford, D. K.; Cecchi, L.; Al-Ahmad, M.; Al-Enezi, F.; Al-Muhsen, S.; Ansotegui, I. und Baena-Cagnani, C. E. 2015. 'Meteorological conditions, climate change, new emerging factors, and asthma and related allergic disorders. A statement of the World Allergy Organization', *World Allergy Organization Journal*, 8: 1-52.
- Dai, L.; Kloog, I.; Coull, B. A.; Sparrow, D.; Spiro, A.; Vokonas, P. S. und Schwartz, J. D. 2016. 'Cognitive Function and Short-Term Exposure to Residential Air Temperature: A Repeated Measures Study Based on Spatiotemporal Estimates of Temperature', *Environmental research*, 150: 446-51.

- Darrow, L. A.; Hess, J.; Rogers, C. A.; Tolbert, P. E.; Klein, M. und Sarnat, S. 2012. 'Ambient pollen concentrations and emergency department visits for asthma and wheeze', *Journal of Allergy Clinical Immunology*, 130: 630-38. e4.
- Davis, R. E.; Dougherty, E.; McArthur, C.; Huang, Q. S. und Baker, M. G. 2016. 'Cold, dry air is associated with influenza and pneumonia mortality in Auckland, New Zealand', *Influenza Other Respir Viruses*, 10: 310-3.
- Davis, R. E.; Rossier, C. E. und Enfield, K. B. 2012. 'The impact of weather on influenza and pneumonia mortality in New York City, 1975-2002: a retrospective study', *PLoS One*, 7: e34091.
- de Marco, R.; Poli, A.; Ferrari, M.; Accordini, S.; Giammanco, G.; Bugiani, M.; Villani, S.; Ponzio, M.; Bono, R.; Carrozzi, L.; Cavallini, R.; Cazzoletti, L.; Dallari, R.; Ginesu, F.; Lauriola, P.; Mandrioli, P.; Perfetti, L.; Pignato, S.; Pirina, P. und Struzzo, P. 2002. 'The impact of climate and traffic-related NO₂ on the prevalence of asthma and allergic rhinitis in Italy', *Clin Exp Allergy*, 32: 1405-12.
- de Weger, L. A.; Bergmann, K. C.; Rantio-Lehtimäki, A.; Dahl, Å.; Buters, J.; Déchamp, C.; Belmonte, J.; Thibaudon, M.; Cecchi, L. und Besancenot, J.-P. 2013. 'Impact of pollen.' in, *Allergenic pollen* (Springer).
- Deisenhammer, E.; Kemmler, G. und Parson, P. 2003. 'Association of meteorological factors with suicide', *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 108: 455-59.
- Denissen, J. J.; Butalid, L.; Penke, L. und van Aken, M. A. 2008. 'The effects of weather on daily mood: a multilevel approach', *Emotion*, 8: 662-7.
- Destatis. 2007. "Gesundheit - Todesursachen in Deutschland 2005." Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, °65.
- Destatis. 2017. "Gesundheit - Todesursachen in Deutschland 2015." Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, °51.
- Destatis. 2019. 'NUTS-Klassifikation', Statistisches Bundesamt, Accessed 26.11.2019. https://www.destatis.de/Europa/DE/Methoden-Metadaten/Klassifikationen/UebersichtKlassifikationen_NUTS.html.
- Ding, N.; Berry, H. L. und Bennett, C. M. 2016. 'The Importance of Humidity in the Relationship between Heat and Population Mental Health: Evidence from Australia', *PLoS One*, 11: e0164190.
- Dixon, P. G. und Kalkstein, A. J. 2018. 'Where are weather-suicide associations valid? An examination of nine US counties with varying seasonality', *International Journal of Biometeorology*, 62: 685-97.

- Dominiak, M.; Swiecicki, L. und Rybakowski, J. 2015. 'Psychiatric hospitalizations for affective disorders in Warsaw, Poland: Effect of season and intensity of sunlight', *Psychiatry research*, 229: 287-94.
- Donaldson, G. C. 2006. 'Climate change and the end of the respiratory syncytial virus season', *Clinical infectious diseases*, 42: 677-79.
- Donaldson, G. C.; Goldring, J. J. und Wedzicha, J. A. 2012. 'Influence of season on exacerbation characteristics in patients with COPD', *Chest*, 141: 94-100.
- du Prel, J. B.; Puppe, W.; Grondahl, B.; Knuf, M.; Weigl, J. A.; Schaaff, F. und Schmitt, H. J. 2009. 'Are meteorological parameters associated with acute respiratory tract infections?', *Clin Infect Dis*, 49: 861-8.
- DWD. 2019. 'Pollenflug-Gefahrenindex', Deutscher Wetterdienst, Accessed 04.12.2019.
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendizespollen/gefahrendindexpollen.html>.
- Ebi, K. L. und Mills, D. 2013. 'Winter mortality in a warming climate: a reassessment', *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4: 203-12.
- Faust, V.; Harlfinger, O.; Neuwirth, R.; Wedler, E. und Wehner, W. 1978. "Bio-Meteorologie. Der Einfluss von Wetter und Klima auf Gesunde und Kranke. Hrsg. von V. Faust." Hippokrates Verlag, Stuttgart.
- Fernandez-Raga, M.; Tomas, C. und Fraile, R. 2010. 'Human mortality seasonality in Castile-Len, Spain, between 1980 and 1998: the influence of temperature, pressure and humidity', *International Journal of Biometeorology*, 54: 379-92.
- Ferrari, U.; Exner, T.; Wanka, E. R.; Bergemann, C.; Meyer-Arneke, J.; Hildenbrand, B.; Tufman, A.; Heumann, C.; Huber, R. M.; Bittner, M. und Fischer, R. 2012. 'Influence of air pressure, humidity, solar radiation, temperature, and wind speed on ambulatory visits due to chronic obstructive pulmonary disease in Bavaria, Germany', *Int J Biometeorol*, 56: 137-43.
- Ford, J. A.; MacLennan, G. S.; Avenell, A.; Bolland, M.; Grey, A.; Witham, M. und for the, R. T. G. 2014. 'Cardiovascular disease and vitamin D supplementation: trial analysis, systematic review, and meta-analysis', *The American Journal of Clinical Nutrition*, 100: 746-55.
- Freitas, M. C.; Pacheco, A. M.; Verburg, T. G. und Wolterbeek, H. T. 2010. 'Effect of particulate matter, atmospheric gases, temperature, and humidity on respiratory and circulatory diseases' trends in Lisbon, Portugal', *Environ Monit Assess*, 162: 113-21.

- Frick, C.; Steiner, H.; Mazurkiewicz, A.; Riediger, U.; Rauthe, M.; Reich, T. und Gratzki, A. 2014. 'Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity', *Meteorologische Zeitschrift*, 23: 15-32.
- Gajić, V.; Milojević, D.; Smailagić, J.; Donović, N.; Matejić, S. und Gajić, S. 2011. 'Influence of biometeorological phases on incidence of suicides', *Medicinski glasnik: official publication of the Medical Association of Zenica-Doboj Canton, Bosnia and Herzegovina*, 8: 24-30.
- García, F.; Boada, S.; Collsamata, A.; Joaquim, I. G.; Pérez, Y. A.; Tricio, O. und Ibiza, C. M. 2009. 'Meteorological factors and psychiatric emergencies', *Actas espanolas de psiquiatria*, 37: 34-41.
- Garcia, V. C.; Gego, E.; Lin, S.; Pantea, C.; Rappazzo, K.; Wootten, A. und Rao, S. T. 2011. 'An evaluation of transported pollution and respiratory-related hospital admissions in the state of New York', *Atmospheric Pollution Research*, 2: 9-15.
- Gasparrini, A.; Armstrong, B.; Kovats, S. und Wilkinson, P. 2012. 'The effect of high temperatures on cause-specific mortality in England and Wales', *Occup Environ Med*, 69: 56-61.
- GmbH, Z. 2018. 'Urbanisierung: Die Stadt von morgen.' in, *Megatrend Dokumentation* (Zukunftsinsitut GmbH).
- Goggins, W. B.; Woo, J.; Ho, S.; Chan, E. Y. und Chau, P. 2012. 'Weather, season, and daily stroke admissions in Hong Kong', *International journal of biometeorology*, 56: 865-72.
- Gomez-Barroso, D.; Leon-Gomez, I.; Delgado-Sanz, C. und Larrauri, A. 2017. 'Climatic Factors and Influenza Transmission, Spain, 2010-2015', *Int J Environ Res Public Health*, 14.
- Goodman, P. G.; Dockery, D. W. und Clancy, L. 2003. 'Cause-Specific Mortality and the Extended Effects of Particulate Pollution and Temperature Exposure', *Environmental Health Perspectives*, 112: 179-85.
- Gosai, A.; Salinger, J. und Dirks, K. 2009. 'Climate and respiratory disease in Auckland, New Zealand', *Aust N Z J Public Health*, 33: 521-6.
- Gosling, S. N.; Hondula, D. M.; Bunker, A.; Ibarreta, D.; Liu, J.; Zhang, X. und Sauerborn, R. 2017. 'Adaptation to climate change: a comparative analysis of modeling methods for heat-related mortality', *Environmental Health Perspectives*, 125: 087008.
- Gosling, S. N.; McGregor, G. R. und Lowe, J. A. 2012. 'The benefits of quantifying climate model uncertainty in climate change impacts assessment: an example with heat-related mortality change estimates', *Climatic Change*, 112: 217-31.

- Grant, W. B.; Bhattoa, H. P. und Boucher, B. J. 2017. 'Seasonal variations of U.S. mortality rates: Roles of solar ultraviolet-B doses, vitamin D, gene expression, and infections', *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 173: 5-12.
- Green, R. S.; Basu, R.; Malig, B.; Broadwin, R.; Kim, J. J. und Ostro, B. 2010. 'The effect of temperature on hospital admissions in nine California counties', *Int J Public Health*, 55: 113-21.
- Grijibovski, A. M.; Kozhakhmetova, G.; Kosbayeva, A. und Menne, B. 2013. 'Associations between air temperature and daily suicide counts in Astana, Kazakhstan', *Medicina*, 49: 59.
- Gronlund, C. J.; Zanobetti, A.; Wellenius, G. A.; Schwartz, J. D. und O'Neill, M. S. 2016. 'Vulnerability to renal, heat and respiratory hospitalizations during extreme heat among US elderly', *Climatic Change*, 136: 631-45.
- Hajat, S. 2017. 'Health effects of milder winters: a review of evidence from the United Kingdom', *Environ Health*, 16: 109-09.
- Hajat, S.; Bird, W. und Haines, A. 2004. 'Cold weather and GP consultations for respiratory conditions by elderly people in 16 locations in the UK', *European journal of epidemiology*, 19: 959-68.
- Hajat, S.; Chalabi, Z.; Wilkinson, P.; Erens, B.; Jones, L. und Mays, N. 2016. 'Public health vulnerability to wintertime weather: time-series regression and episode analyses of national mortality and morbidity databases to inform the Cold Weather Plan for England', *Public health*, 137: 26-34.
- Hajat, S. und Haines, A. 2002. 'Associations of cold temperatures with GP consultations for respiratory and cardiovascular disease amongst the elderly in London', *International journal of Epidemiology*, 31: 825-30.
- Hajat, S.; Kovats, R. S.; Atkinson, R. W. und Haines, A. 2002. 'Impact of hot temperatures on death in London: a time series approach', *Journal of Epidemiology & Community Health*, 56: 367-72.
- Hajat, S.; Vardoulakis, S.; Heaviside, C. und Eggen, B. 2014. 'Climate change effects on human health: projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s', *J Epidemiol Community Health*, 68: 641-48.
- Hakkarainen, R.; Johansson, C.; Kieseppä, T.; Partonen, T.; Koskenvuo, M.; Kaprio, J. und Lönnqvist, J. 2003. 'Seasonal changes, sleep length and circadian preference among twins with bipolar disorder', *BMC Psychiatry*, 3: 6.

- Hales, S.; Kovats, S.; Lloyd, S. und Campbell-Lendrum, D. 2014. *Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s* (World Health Organization).
- Hanigan, I. C.; Butler, C. D.; Kokic, P. N. und Hutchinson, M. F. 2012. 'Suicide and drought in New South Wales, Australia, 1970–2007', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109: 13950-55.
- Hansen, A.; Bi, P.; Nitschke, M.; Ryan, P.; Pisaniello, D. und Tucker, G. 2008. 'The Effect of Heat Waves on Mental Health in a Temperate Australian City', *Environmental Health Perspectives*, 116: 1369-75.
- Hebbern, C. und Cakmak, S. 2015. 'Synoptic weather types and aeroallergens modify the effect of air pollution on hospitalisations for asthma hospitalisations in Canadian cities', *Environ Pollut*, 204: 9-16.
- Hedderich, J. und Sachs, L. 2016. *Angewandte Statistik* (Springer Spektrum: Berlin u. Heidelberg).
- Henríquez-Sánchez, P.; Doreste-Alonso, J.; Martínez-González, M. A.; Bes-Rastrollo, M.; Gea, A. und Sánchez-Villegas, A. 2014. 'Geographical and climatic factors and depression risk in the SUN project', *European Journal of Public Health*, 24: 626-31.
- Hervás, D.; Utrera, J. F.; Hervas-Masip, J.; Hervas, J. A. und Garcia-Marcos, L. 2015. 'Can meteorological factors forecast asthma exacerbation in a paediatric population?', *Allergol Immunopathol (Madr)*, 43: 32-6.
- Hiltunen, L.; Haukka, J.; Ruuhela, R.; Suominen, K. und Partonen, T. 2014. 'Local daily temperatures, thermal seasons, and suicide rates in Finland from 1974 to 2010', *Environmental Health and Preventive Medicine*, 19: 286-94.
- Hiltunen, L.; Ruuhela, R.; Ostamo, A.; Lönnqvist, J.; Suominen, K. und Partonen, T. 2012. 'Atmospheric pressure and suicide attempts in Helsinki, Finland', *International Journal of Biometeorology*, 56: 1045-53.
- Hiltunen, L.; Suominen, K.; Lonnqvist, J. und Partonen, T. 2011. 'Relationship between daylength and suicide in Finland', *J Circadian Rhythms*, 9: 10.
- Hoffmann, B.; Hertel, S.; Boes, T.; Weiland, D. und Jockel, K. H. 2008. 'Increased cause-specific mortality associated with 2003 heat wave in Essen, Germany', *J Toxicol Environ Health A*, 71: 759-65.
- Hoffmann, B.; Luttmann-Gibson, H.; Cohen, A.; Zanobetti, A.; de Souza, C.; Foley, C.; Suh, H. H.; Coull, B. A.; Schwartz, J. und Mittleman, M. 2011. 'Opposing effects of particle pollution, ozone, and ambient temperature on arterial blood pressure', *Environmental health perspectives*, 120: 241-46.

- Höflich, C.; Balakirski, G.; Hajdu, Z.; Baron, J. M.; Kaiser, L.; Czaja, K.; Merk, H. F.; Gerdson, S.; Strassen, U. und Bas, M. 2016. 'Potential health risk of allergenic pollen with climate change associated spreading capacity: ragweed and olive sensitization in two German federal states', *International journal of hygiene and environmental health*, 219: 252-60.
- Hondula, D. M.; Balling, R. C.; Vanos, J. K. und Georgescu, M. 2015. 'Rising temperatures, human health, and the role of adaptation', *Current Climate Change Reports*, 1: 144-54.
- Höppe, P.; von Mackensen, S.; Nowak, D. und Piel, E. 2002. 'Prävalenz von Wetterfühligkeit in Deutschland', *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 127: 15-20.
- Huang, C.; Barnett, A. G.; Wang, X.; Vaneckova, P.; FitzGerald, G. und Tong, S. 2011. 'Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review', *Environmental Health Perspectives*, 119: 1681-90.
- Huibers, M. J.; de Graaf, L. E.; Peeters, F. P. und Arntz, A. 2010. 'Does the weather make us sad? Meteorological determinants of mood and depression in the general population', *Psychiatry Res*, 180: 143-6.
- Huynen, M. M. und Martens, P. 2015. 'Climate change effects on heat-and cold-related mortality in the Netherlands: a scenario-based integrated environmental health impact assessment', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12: 13295-320.
- Ikäheimo, T. M.; Jaakkola, K.; Jokelainen, J.; Saukkoriipi, A.; Roivainen, M.; Juvonen, R.; Vainio, O. und Jaakkola, J. J. 2016. 'A Decrease in Temperature and Humidity Precedes Human Rhinovirus Infections in a Cold Climate', *Viruses*, 8.
- IPCC. 2013. "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.", Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. und Midgley, P. M. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535 pp.
- Ishigami, A.; Hajat, S.; Kovats, R. S.; Bisanti, L.; Rognoni, M.; Russo, A. und Paldy, A. 2008. 'An ecological time-series study of heat-related mortality in three European cities', *Environmental Health*, 7: 5.
- Islam, M. S.; Chausalet, T. J. und Koizumi, N. 2017. 'Towards a threshold climate for emergency lower respiratory hospital admissions', *Environ Res*, 153: 41-47.
- Ito, K.; Thurston, G. D. und Silverman, R. A. 2007. 'Characterization of PM2.5, gaseous pollutants, and meteorological interactions in the context of time-series health effects models', *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 17 Suppl 2: S45-60.

- Jaakkola, J. J. K. 2003. 'Case-crossover design in air pollution epidemiology', *European Respiratory Journal*, 21: 81S-85s.
- Johnston, N. W.; Johnston, S. L.; Norman, G. R.; Dai, J. und Sears, M. R. 2006. 'The September epidemic of asthma hospitalization: school children as disease vectors', *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 117: 557-62.
- Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Hölscher, L.; Undorf, S.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Crespi, A.; Renner, K.; Zebisch, M.; Fritsch, U. und Schauser, I. 2021. "Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021. Teilbericht 6: Integrierte Auswertung - Klimarisiken, Handlungserfordernisse und Forschungsbedarfe." Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, °171.
- Kalbitzer, J.; Erritzoe, D.; Holst, K. K.; Nielsen, F. Å.; Marner, L.; Lehel, S.; Arentzen, T.; Jernigan, T. L. und Knudsen, G. M. 2010. 'Seasonal changes in brain serotonin transporter binding in short serotonin transporter linked polymorphic region-allele carriers but not in long-allele homozygotes', *Biological psychiatry*, 67: 1033-39.
- Kan, H. und Chen, B. 2003. 'A case-crossover analysis of air pollution and daily mortality in Shanghai', *Journal of occupational health*, 45: 119-24.
- Keller, M. C.; Fredrickson, B. L.; Ybarra, O.; Côté, S.; Johnson, K.; Mikels, J.; Conway, A. und Wager, T. 2005. 'A warm heart and a clear head: The contingent effects of weather on mood and cognition', *Psychological science*, 16: 724-31.
- Kerr, D. C. R.; Shaman, J.; Washburn, I. J.; Vuchinich, S.; Nepl, T. K.; Capaldi, D. M. und Conger, R. D. 2013. 'Two Longterm Studies of Seasonal Variation in Depressive Symptoms among Community Participants', *Journal of Affective Disorders*, 151: 10.1016/j.jad.2013.07.019.
- Kingsley, S. L.; Eliot, M. N.; Gold, J.; Vanderslice, R. R. und Wellenius, G. A. 2016. 'Current and projected heat-related morbidity and mortality in Rhode Island', *Environmental Health Perspectives*, 124: 460-67.
- Kjellström, E.; Nikulin, G.; Strandberg, G.; Christensen, O. B.; Jacob, D.; Keuler, K.; Lenderink, G.; van Meijgaard, E.; Schär, C. und Somot, S. 2018. 'European climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2 degrees C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models', *Earth System Dynamics*, 9: 459-78.
- Knieps, F. und Pfaff, H. H. 2018. 'BKK Gesundheitsreport 2018', *MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft*
- Koppe, C. 2005. "Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen

- Witterungsverhältnisse." *Bericht des Deutschen Wetterdienstes* 226. Offenbach am Main, Deutschland.
- Koppe, C.; Bernhard, D. und Zacharias, S. 2013a. "Einfluss des Wetters auf das Auftreten von ischämischen Herzkrankheiten (ICD Code: I20-I25) in Deutschland." *Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt,°67.
- Koppe, C. und Jendritzky, G. 2005. 'Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure', *Meteorologische Zeitschrift*, 14: 271-78.
- Koppe, C.; Zacharias, S. und Bernhard, D. 2013b. 'Repräsentativbefragung zur Wetterfühligkeit in Deutschland', *Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238*.
- Kordić, M.; Babić, D.; Petrov, B.; Kordić, J.; Jelavić, B. und Pivić, G. 2010. 'The meteorological factors associated with suicide', *Collegium antropologicum*, 34: 151-55.
- Kovats, R. S.; Hajat, S. und Wilkinson, P. 2004. 'Contrasting patterns of mortality and hospital admissions during hot weather and heat waves in Greater London, UK', *Occup Environ Med*, 61: 893-8.
- Kysely, J. und Kriz, B. 2003. 'High summer temperatures and mortality in the Czech Republic 1982-2000', *Epidemiologie, mikrobiologie, imunologie: casopis Spolecnosti pro epidemiologii a mikrobiologii Ceske lekarske spolecnosti JE Purkyne*, 52: 105-16.
- Laaidi, M.; Laaidi, K. und Besancenot, J. P. 2006. 'Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming', *Int J Biometeorol*, 51: 145-53.
- Lacour, S. A.; de Monte, M.; Diot, P.; Brocca, J.; Veron, N.; Colin, P. und Leblond, V. 2006. 'Relationship between ozone and temperature during the 2003 heat wave in France: consequences for health data analysis', *BMC Public Health*, 6.
- Lambert, G.; Reid, C.; Kaye, D.; Jennings, G. und Esler, M. 2003. 'Increased suicide rate in the middle-aged and its association with hours of sunlight', *American Journal of Psychiatry*, 160: 793-95.
- Landers, T.; Naromtami, P.; Govender, S. und Van Dellen, A. 1997. 'The effect of changes in barometric pressure on the risk of rupture of intracranial aneurysms', *British journal of neurosurgery*, 11: 191-95.
- Lavigne, E.; Gasparrini, A.; Wang, X.; Chen, H.; Yagouti, A.; Fleury, M. D. und Cakmak, S. 2014. 'Extreme ambient temperatures and cardiorespiratory emergency room visits: assessing risk by comorbid health conditions in a time series study', *Environ Health*, 13: 5.

- Lee, C. C.; Sheridan, S. C. und Lin, S. 2012. 'Relating weather types to asthma-related hospital admissions in New York State', *Ecohealth*, 9: 427-39.
- Lee, H. C.; Hu, C. J.; Chen, C. S. und Lin, H. C. 2008. 'Seasonal Variation in Ischemic Stroke Incidence and Association with Climate: A Six-Year Population-Based Study', *Chronobiology international*, 25: 938-49.
- Lee, J. H.; Chae, S. C.; Yang, D. H.; Park, H. S.; Cho, Y.; Jun, J.-E.; Park, W.-H.; Kam, S.; Lee, W. K. und Kim, Y. J. 2010. 'Influence of weather on daily hospital admissions for acute myocardial infarction (from the Korea Acute Myocardial Infarction Registry)', *International journal of cardiology*, 144: 16-21.
- Liang, W.-M.; Liu, W.-P.; Chou, S.-Y. und Kuo, H.-W. 2008. 'Ambient temperature and emergency room admissions for acute coronary syndrome in Taiwan', *International journal of biometeorology*, 52: 223-29.
- Lin, S.; Hsu, W.-H.; Van Zutphen, A. R.; Saha, S.; Lubber, G. und Hwang, S.-A. 2012a. 'Excessive heat and respiratory hospitalizations in New York State: estimating current and future public health burden related to climate change', *Environmental Health Perspectives*, 120: 1571-77.
- Lin, S.; Insaf, T. Z.; Luo, M. und Hwang, S. A. 2012b. 'The effects of ambient temperature variation on respiratory hospitalizations in summer, New York State', *Int J Occup Environ Health*, 18: 188-97.
- Lin, S.; Jones, R.; Liu, X. und Hwang, S.-A. 2011. 'Impact of the return to school on childhood asthma burden in New York State', *Int J Occup Environ Health*, 17: 9-16.
- Lin, S.; Luo, M.; Walker, R. J.; Liu, X.; Hwang, S. A. und Chinery, R. 2009. 'Extreme high temperatures and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases', *Epidemiology*, 20: 738-46.
- Linares, C.; Diaz, J.; Tobías, A.; Carmona, R. und Mirón, I. 2015. 'Impact of heat and cold waves on circulatory-cause and respiratory-cause mortality in Spain: 1975–2008', *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29: 2037-46.
- Lindqvist, P.; Epstein, E.; Nielsen, K.; Landin-Olsson, M.; Ingvar, C. und Olsson, H. 2016. 'Avoidance of sun exposure as a risk factor for major causes of death: a competing risk analysis of the Melanoma in Southern Sweden cohort', *Journal of internal medicine*, 280: 375-87.
- Liu, D.; Fernandez, B. O.; Hamilton, A.; Lang, N. N.; Gallagher, J. M. C.; Newby, D. E.; Feelisch, M. und Weller, R. B. 2014. 'UVA Irradiation of Human Skin Vasodilates Arterial Vasculature and Lowers Blood Pressure Independently of Nitric Oxide Synthase', *Journal of Investigative Dermatology*, 134: 1839-46.

- Löhmus, M. 2018. 'Possible biological mechanisms linking mental health and heat—a contemplative review', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15: 1515.
- Lombardi, D. A. 2010. 'The case-crossover study: a novel design in evaluating transient fatigue as a risk factor for road traffic accidents', *Sleep*, 33: 283-84.
- Lowen, A. C.; Mubareka, S.; Steel, J. und Palese, P. 2007. 'Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature', *PLoS pathogens*, 3: e151.
- Lyall, L. M.; Wyse, C. A.; Celis-Morales, C. A.; Lyall, D. M.; Cullen, B.; Mackay, D.; Ward, J.; Graham, N.; Strawbridge, R. J. und Gill, J. M. 2018. 'Seasonality of depressive symptoms in women but not in men: A cross-sectional study in the UK Biobank cohort', *Journal of Affective Disorders*, 229: 296-305.
- Madrigano, J.; Ito, K.; Johnson, S.; Kinney, P. L. und Matte, T. 2015. 'A case-only study of vulnerability to heat wave-related mortality in new york city (2000–2011)', *Environmental Health Perspectives*, 123: 672.
- Mäkinen, T. M.; Juvonen, R.; Jokelainen, J.; Harju, T. H.; Peitso, A.; Bloigu, A.; Silvennoinen-Kassinen, S.; Leinonen, M. und Hassi, J. 2009. 'Cold temperature and low humidity are associated with increased occurrence of respiratory tract infections', *Respir Med*, 103: 456-62.
- Makra, L.; Puskas, J.; Matyasovszky, I.; Csepe, Z.; Lelovics, E.; Balint, B. und Tusnady, G. 2015. 'Weather elements, chemical air pollutants and airborne pollen influencing asthma emergency room visits in Szeged, Hungary: performance of two objective weather classifications', *Int J Biometeorol*, 59: 1269-89.
- Makris, G. D.; Reutfors, J.; Larsson, R.; Isacson, G.; Ösby, U.; Ekblom, A.; Ekselius, L. und Papadopoulos, F. C. 2016. 'Serotonergic medication enhances the association between suicide and sunshine', *Journal of Affective Disorders*, 189: 276-81.
- Marks, G. B.; Colquhoun, J. R.; Girgis, S. T.; Koski, M. H.; Treloar, A. B.; Hansen, P.; Downs, S. H. und Car, N. G. 2001. 'Thunderstorm outflows preceding epidemics of asthma during spring and summer', *Thorax*, 56: 468-71.
- Masterton, J. und Richardson, F. 1979. *Humidex: A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity*, by JM Masterton and FA Richardson (Ministere de l'Environnement).
- Mastrandrea, M. D.; Field, C. B.; Stocker, T. F.; Edenhofer, O.; Ebi, K. L.; Frame, D. J.; Held, H.; Kriegler, E.; Mach, K. J. und Matschoss, P. R. 2010. 'Guidance note for lead authors of the IPCC fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties'.

- Mastrangelo, G.; Fedeli, U.; Visentin, C.; Milan, G.; Fadda, E. und Spolaore, P. 2007. 'Pattern and determinants of hospitalization during heat waves: an ecologic study', *BMC Public Health*, 7: 200.
- Matzarakis, A. 2013. 'Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels', *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft*, 73: 115-18.
- Matzarakis, A. und Endler, C. 2010. 'Climate change and thermal bioclimate in cities: impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany', *Int J Biometeorol*, 54: 479-83.
- Matzarakis, A.; Muthers, S. und Koch, E. 2011. 'Human biometeorological evaluation of heat-related mortality in Vienna', *Theoretical and Applied Climatology*, 105: 1-10.
- Mazenq, J.; Dubus, J.-C.; Gaudart, J.; Charpin, D.; Nougairede, A.; Viudes, G. und Noel, G. 2017a. 'Air pollution and children's asthma-related emergency hospital visits in southeastern France', *European journal of pediatrics*, 176: 705-11.
- Mazenq, J.; Dubus, J.-C.; Gaudart, J.; Charpin, D.; Viudes, G. und Noel, G. 2017b. 'City housing atmospheric pollutant impact on emergency visit for asthma: A classification and regression tree approach', *Respiratory medicine*, 132: 1-8.
- McMichael, A. J.; Woodruff, R. E. und Hales, S. 2006. 'Climate change and human health: present and future risks', *The Lancet*, 367: 859-69.
- McWilliams, S.; Kinsella, A. und O'Callaghan, E. 2013. 'The effects of daily weather variables on psychosis admissions to psychiatric hospitals', *International Journal of Biometeorology*, 57: 497-508.
- McWilliams, S.; Kinsella, A. und O'Callaghan, E. 2014. 'Daily weather variables and affective disorder admissions to psychiatric hospitals', *International Journal of Biometeorology*, 58: 2045-57.
- Medici, C. R.; Vestergaard, C. H.; Hadzi-Pavlovic, D.; Munk-Jørgensen, P. und Parker, G. 2016. 'Seasonal variations in hospital admissions for mania: Examining for associations with weather variables over time', *Journal of Affective Disorders*, 205: 81-86.
- Mehta, A. J.; Kubzansky, L. D.; Coull, B. A.; Kloog, I.; Koutrakis, P.; Sparrow, D.; Spiro, A.; Vokonas, P. und Schwartz, J. 2015. 'Associations between air pollution and perceived stress: the Veterans Administration Normative Aging Study', *Environmental Health*, 14: 10.
- Mentzakis, E. und Delfino, D. 2010. 'Effects of air pollution and meteorological parameters on human health in the city of Athens, Greece', *International Journal of Environment and Pollution*, 40: 210-25.

- Messner, T. 2005. 'Environmental variables and the risk of disease', *International Journal of Circumpolar Health*, 64: 523-33.
- Michelozzi, P.; Accetta, G.; De Sario, M.; D'Ippoliti, D.; Marino, C.; Baccini, M.; Biggeri, A.; Anderson, H. R.; Katsouyanni, K. und Ballester, F. 2009. 'High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities', *American journal of respiratory and critical care medicine*, 179: 383-89.
- Mirabelli, M. C.; Vaidyanathan, A.; Flanders, W. D.; Qin, X. und Garbe, P. 2016. 'Outdoor PM2.5, Ambient Air Temperature, and Asthma Symptoms in the Past 14 Days among Adults with Active Asthma', *Environ Health Perspect*, 124: 1882-90.
- Mireku, N.; Wang, Y.; Ager, J.; Reddy, R. C. und Baptist, A. P. 2009. 'Changes in weather and the effects on pediatric asthma exacerbations', *Ann Allergy Asthma Immunol*, 103: 220-4.
- Miron, I. J.; Linares, C.; Montero, J. C.; Criado-Alvarez, J. J. und Díaz, J. 2015. 'Changes in cause-specific mortality during heat waves in central Spain, 1975–2008', *International Journal of Biometeorology*, 59: 1213-22.
- Mohr, L. B.; Luo, S.; Mathias, E.; Tobing, R.; Homan, S. und Sterling, D. 2008. 'Influence of season and temperature on the relationship of elemental carbon air pollution to pediatric asthma emergency room visits', *J Asthma*, 45: 936-43.
- Monsalve, F. 2013. 'Influence of Meteorological Parameters and Air Pollutants onto the Morbidity due to Respiratory Diseases in Castilla-La Mancha, Spain', *Aerosol and Air Quality Research*.
- Monteiro, A.; Carvalho, V.; Oliveira, T. und Sousa, C. 2013. 'Excess mortality and morbidity during the July 2006 heat wave in Porto, Portugal', *Int J Biometeorol*, 57: 155-67.
- Monteiro, A. und Velho, S. 2014. 'Health heat stress in the Porto Metropolitan Area - a matter of temperature or inadequate adaptation?', *Erde*, 145: 80-95.
- Moore, F. R.; Bell, M.; Macleod, M.; Smith, E.; Beaumont, J.; Graham, L. und Harley, T. A. 2018. 'Season, weather, and suicide—Further evidence for ecological complexity', *Neurology, Psychiatry and Brain Research*, 30: 110-16.
- Mora, C.; Dousset, B.; Caldwell, I. R.; Powell, F. E.; Geronimo, R. C.; Bielecki, C. R.; Counsell, C. W.; Dietrich, B. S.; Johnston, E. T. und Louis, L. V. 2017. 'Global risk of deadly heat', *Nature Climate Change*, 7: 501.
- Morali, D.; Jehel, L. und Paterniti, S. 2008. 'The August 2003 heat wave in France: Effects on psychiatric disorders and suicidal behavior', *Presse medicale (Paris, France: 1983)*, 37: 224-28.

- Morken, G.; Lilleeng, S. und Linaker, O. M. 2002. 'Seasonal variation in suicides and in admissions to hospital for mania and depression', *Journal of Affective Disorders*, 69: 39-45.
- Müller, H.; Biermann, T.; Renk, S.; Reulbach, U.; Ströbel, A.; Kornhuber, J. und Sperling, W. 2011. 'Higher environmental temperature and global radiation are correlated with increasing suicidality—a localized data analysis', *Chronobiology international*, 28: 949-57.
- Mullins, J. und White, C. 2018. "Temperature, Climate Change, and Mental Health: Evidence from the Spectrum of Mental Health Outcomes (No. 1801)." California Polytechnic State University, Department of Economics.
- Murage, P.; Hajat, S. und Kovats, R. S. 2017. 'Effect of night-time temperatures on cause and age-specific mortality in London', *Environmental Epidemiology*: 1.
- Muthers, S.; Laschewski, G. und 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: 224.
- Nahmias, J.; Poola, S.; Doben, A.; Garb, J. und Gross, R. I. 2017. 'Seasonal Variation of Trauma in Western Massachusetts: Fact or Folklore?', *Trauma Surgery & Acute Care Open*, 2: e000120.
- Nakazawa, M. 2019. "Package "fmsb": Functions for Medical Statistic Book with some Demographic Data."
- Nastos, P. T. und Matzarakis, A. 2006. 'Weather impacts on respiratory infections in Athens, Greece', *International Journal of Biometeorology*, 50: 358-69.
- Nastos, P. T.; Paliatsos, A. G.; Papadopoulos, M.; Bakoula, C. und Priftis, K. N. 2008. 'The effect of weather variability on pediatric asthma admissions in Athens, Greece', *J Asthma*, 45: 59-65.
- Nitschke, M.; Tucker, G. und Bi, P. 2007. 'Morbidity and mortality during heatwaves in metropolitan Adelaide', *The Medical journal of Australia*, 187: 662-65.
- Noelke, C.; McGovern, M.; Corsi, D. J.; Jimenez, M. P.; Stern, A.; Wing, I. S. und Berkman, L. 2016. 'Increasing ambient temperature reduces emotional well-being', *Environmental research*, 151: 124-29.
- O'Hare, C.; O'Sullivan, V.; Flood, S. und Kenny, R. A. 2016. 'Seasonal and meteorological associations with depressive symptoms in older adults: A geo-epidemiological study', *Journal of Affective Disorders*, 191: 172-79.

- Ogbomo, A. S.; Gronlund, C. J.; O'Neill, M. S.; Konen, T.; Cameron, L. und Wahl, R. 2017. 'Vulnerability to extreme-heat-associated hospitalization in three counties in Michigan, USA, 2000-2009', *Int J Biometeorol*, 61: 833-43.
- Ostro, B.; Rauch, S.; Green, R.; Malig, B. und Basu, R. 2010. 'The effects of temperature and use of air conditioning on hospitalizations', *Am J Epidemiol*, 172: 1053-61.
- Oudin Åström, D.; Schifano, P.; Asta, F.; Lallo, A.; Michelozzi, P.; Rocklöv, J. und Forsberg, B. 2015. 'The effect of heat waves on mortality in susceptible groups: a cohort study of a mediterranean and a northern European City', *Environmental Health*, 14: 30.
- Page, L. A.; Hajat, S. und Kovats, R. S. 2007. 'Relationship between daily suicide counts and temperature in England and Wales', *The British Journal of Psychiatry*, 191: 106-12.
- Page, L. A.; Hajat, S.; Kovats, R. S. und Howard, L. M. 2012. 'Temperature-related deaths in people with psychosis, dementia and substance misuse', *The British Journal of Psychiatry*, 200: 485-90.
- Pandey, J.; Grandner, M.; Crittenden, C.; Smith, M. T. und Perlis, M. L. 2005. 'Meteorologic factors and subjective sleep continuity: a preliminary evaluation', *International Journal of Biometeorology*, 49: 152-55.
- Papadopoulos, F. C.; Frangakis, C. E.; Skalkidou, A.; Petridou, E.; Stevens, R. G. und Trichopoulos, D. 2005. 'Exploring lag and duration effect of sunshine in triggering suicide', *J Affect Disord*, 88: 287-97.
- Parker, G. B.; Hadzi-Pavlovic, D. und Graham, R. K. 2017. 'Examining for any impact of climate change on the association between seasonality and hospitalization for mania', *Journal of Affective Disorders*, 208: 431-35.
- Partonen, T.; Haukka, J.; Viilo, K.; Hakko, H.; Pirkola, S.; Isometsä, E.; Lönnqvist, J.; Särkioja, T.; Väisänen, E. und Räsänen, P. 2004. 'Cyclic time patterns of death from suicide in northern Finland', *Journal of Affective Disorders*, 78: 11-19.
- Peng, R. D.; Bobb, J. F.; Tebaldi, C.; McDaniel, L.; Bell, M. L. und Dominici, F. 2011. 'Toward a quantitative estimate of future heat wave mortality under global climate change', *Environmental Health Perspectives*, 119: 701-06.
- Pesce, G.; Bugiani, M.; Marcon, A.; Marchetti, P.; Carosso, A.; Accordini, S.; Antonicelli, L.; Cogliani, E.; Pirina, P.; Pocetta, G.; Spinelli, F.; Villani, S. und de Marco, R. 2016. 'Geo-climatic heterogeneity in self-reported asthma, allergic rhinitis and chronic bronchitis in Italy', *Sci Total Environ*, 544: 645-52.

- Petkova, E. P.; Horton, R. M.; Bader, D. A. und Kinney, P. L. 2013. 'Projected heat-related mortality in the US urban northeast', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10: 6734-47.
- Petkova, E. P.; Vink, J. K.; Horton, R. M.; Gasparrini, A.; Bader, D. A.; Francis, J. D. und Kinney, P. L. 2017. 'Towards more comprehensive projections of urban heat-related mortality: estimates for New York City under multiple population, adaptation, and climate scenarios', *Environmental Health Perspectives*, 125: 47-55.
- Petridou, E.; Papadopoulos, F. C.; Frangakis, C. E.; Skalkidou, A. und Trichopoulos, D. 2002. 'A role of sunshine in the triggering of suicide', *Epidemiology*, 13: 106-09.
- Pfaar, O.; Bastl, K.; Berger, U.; Buters, J.; Calderon, M.; Clot, B.; Darsow, U.; Demoly, P.; Durham, S. und Galán, C. J. A. 2017. 'Defining pollen exposure times for clinical trials of allergen immunotherapy for pollen-induced rhinoconjunctivitis—an EAACI position paper', 72: 713-22.
- Phung, D.; Thai, P. K.; Guo, Y.; Morawska, L.; Rutherford, S. und Chu, C. 2016. 'Ambient temperature and risk of cardiovascular hospitalization: An updated systematic review and meta-analysis', *Science of The Total Environment*, 550: 1084-102.
- Plavcová, E. und Kyselý, J. 2014. 'Effects of sudden air pressure changes on hospital admissions for cardiovascular diseases in Prague, 1994–2009', *International journal of biometeorology*, 58: 1327-37.
- Power, M. C.; Kioumourtzoglou, M.-A.; Hart, J. E.; Okereke, O. I.; Laden, F. und Weiskopf, M. G. 2015. 'The relation between past exposure to fine particulate air pollution and prevalent anxiety: observational cohort study', *The BMJ*, 350: h1111.
- Praschak-Rieder, N.; Willeit, M.; Wilson, A. A.; Houle, S. und Meyer, J. H. 2008. 'Seasonal variation in human brain serotonin transporter binding', *Archives of general psychiatry*, 65: 1072-78.
- Priftis, K. N.; Paliatsos, A. G.; Panagiotopoulou-Gartagani, P.; Tapratzi-Potamianou, P.; Zachariadi-Xypolita, A.; Nicolaidou, P. und Saxoni-Papageorgiou, P. 2006. 'Association of weather conditions with childhood admissions for wheezy bronchitis or asthma in Athens', *Respiration*, 73: 783-90.
- Promet. 2007. 'Biometeorologie des Menschen', *Promet*, Jahrgang 33: 180 S.
- Pun, V. C.; Manjourides, J. und Suh, H. 2017. 'Association of Ambient Air Pollution with Depressive and Anxiety Symptoms in Older Adults: Results from the NSHAP Study', *Environmental Health Perspectives*, 125: 342-48.

- Qi, X.; Hu, W.; Page, A. und Tong, S. 2015. 'Associations between climate variability, unemployment and suicide in Australia: a multicity study', *BMC Psychiatry*, 15: 114.
- R-Core-Team. 2019. "R: A language and environment for statistical computing.". Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rabe, K. F.; Hurd, S.; Anzueto, A.; Barnes, P. J.; Buist, S. A.; Calverley, P.; Fukuchi, Y.; Jenkins, C.; Rodriguez-Roisin, R. und Van Weel, C. 2007. 'Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease: GOLD executive summary', *American journal of respiratory critical care medicine*, 176: 532-55.
- Radua, J.; Pertusa, A. und Cardoner, N. 2010. 'Climatic relationships with specific clinical subtypes of depression', *Psychiatry Res*, 175: 217-20.
- Razafimaharo, C.; Krähenmann, S.; Höpp, S.; Rauthe, M. und Deutschländer, T. 2020. 'New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS)', *Theoretical and Applied Climatology*, 142: 1531-53.
- Ren, C.; Williams, G. M. und Tong, S. 2006. 'Does particulate matter modify the association between temperature and cardiorespiratory diseases?', *Environ Health Perspect*, 114: 1690-6.
- Revich, B. und Shaposhnikov, D. 2008. 'Temperature-induced excess mortality in Moscow, Russia', *Int J Biometeorol*, 52: 367-74.
- Rey, G.; Jougl, E.; Fouillet, A.; Pavillon, G.; Bessemoulin, P.; Frayssinet, P.; Clavel, J. und Hémon, D. 2007. 'The impact of major heat waves on all-cause and cause-specific mortality in France from 1971 to 2003', *International archives of occupational and environmental health*, 80: 615-26.
- RKI und Destatis. 2015. "Gesundheit in Deutschland. Gesundheitsberichterstattung des Bundes." RKI: Berlin.
- Robine, J.-M.; Cheung, S. L. K.; Le Roy, S.; Van Oyen, H.; Griffiths, C.; Michel, J.-P. und Herrmann, F. R. 2008. 'Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003', *Comptes rendus biologiques*, 331: 171-78.
- Rocklöv, J.; Forsberg, B.; Ebi, K. und Bellander, T. 2014. 'Susceptibility to mortality related to temperature and heat and cold wave duration in the population of Stockholm County, Sweden', *Global Health Action*, 7: 10.3402/gha.v7.22737.
- Röcklöv, J.; Forsberg, B. und Meister, K. 2009. 'Winter mortality modifies the heat-mortality association the following summer', *European Respiratory Journal*, 33: 245-51.

- Ruhé, H. G.; Booij, J.; Reitsma, J. B. und Schene, A. H. 2009. 'Serotonin transporter binding with [123 I] β -CIT SPECT in major depressive disorder versus controls: effect of season and gender', *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 36: 841-49.
- Ruuhela, R.; Hiltunen, L.; Venalainen, A.; Pirinen, P. und Partonen, T. 2009. 'Climate impact on suicide rates in Finland from 1971 to 2003', *Int J Biometeorol*, 53: 167-75.
- Ryti, N. R.; Guo, Y. und Jaakkola, J. J. 2015. 'Global association of cold spells and adverse health effects: a systematic review and meta-analysis', *Environmental Health Perspectives*, 124: 12-22.
- Sandsund, M.; Reinertsen, R. E.; Holand, B. und Bjermer, L. 2007. 'Thermoregulatory and respiratory responses in asthmatic and nonasthmatic subjects breathing cold and warm air during exercise in the cold', *Journal of Thermal Biology*, 32: 246-54.
- Santus, P.; Russo, A.; Madonini, E.; Allegra, L.; Blasi, F.; Centanni, S.; Miadonna, A.; Schiraldi, G. und Amaducci, S. 2012. 'How air pollution influences clinical management of respiratory diseases. A case-crossover study in Milan', *Respir Res*, 13: 95.
- Schlegel, I.; Muthers, S.; Mücke, H.-G. und Matzarakis, A. 2020. 'Comparison of Respiratory and Ischemic Heart Mortalities and their Relationship to the Thermal Environment', *Atmosphere*, 11: 826.
- Schory, T. J.; Piecznski, N.; Nair, S. und El-Mallakh, R. S. 2003. 'Barometric Pressure, Emergency Psychiatric Visits, and Violent Acts', *The Canadian Journal of Psychiatry*, 48: 624-27.
- Schwartz, J. 2005. 'Who is Sensitive to Extremes of Temperature?', *Epidemiology*, 16: 67-72.
- Seregi, B.; Kapitány, B.; Maróti-Agóts, Á.; Rihmer, Z.; Gonda, X. und Döme, P. 2017. 'Weak associations between the daily number of suicide cases and amount of daily sunlight', *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 73: 41-48.
- Setzer, M.; Beck, J.; Hermann, E.; Raabe, A.; Seifert, V.; Vatter, H. und Marquardt, G. 2007. 'The influence of barometric pressure changes and standard meteorological variables on the occurrence and clinical features of subarachnoid hemorrhage', *Surgical neurology*, 67: 264-72.
- Sherbakov, T.; Malig, B.; Guirguis, K.; Gershunov, A. und Basu, R. 2018. 'Ambient temperature and added heat wave effects on hospitalizations in California from 1999 to 2009', *Environ Res*, 160: 83-90.
- Sheridan, S. C.; Allen, M. J.; Lee, C. C. und Kalkstein, L. S. 2012. 'Future heat vulnerability in California, Part II: projecting future heat-related mortality', *Climatic Change*, 115: 311-26.

- Sheridan, S. C. und Lin, S. 2014. 'Assessing variability in the impacts of heat on health outcomes in New York city over time, season, and heat-wave duration', *Ecohealth*, 11: 512-25.
- Shiue, I.; Perkins, D. R. und Bearman, N. 2016. 'Physically equivalent temperature and mental and behavioural disorders in Germany in 2009–2011', *Journal of Mental Health*, 25: 148-53.
- Signorelli, S. S.; Ferrante, M.; Gaudio, A. und Fiore, V. 2017. 'Deep vein thrombosis related to environment (Review)', *Mol Med Rep*, 15: 3445-48.
- Smith, S.; Elliot, A. J.; Hajat, S.; Bone, A.; Bates, C.; Smith, G. E. und Kovats, S. 2016. 'The Impact of Heatwaves on Community Morbidity and Healthcare Usage: A Retrospective Observational Study Using Real-Time Syndromic Surveillance', *Int J Environ Res Public Health*, 13.
- Soneja, S.; Jiang, C.; Fisher, J.; Upperman, C. R.; Mitchell, C. und Sapkota, A. 2016. 'Exposure to extreme heat and precipitation events associated with increased risk of hospitalization for asthma in Maryland, USA', *Environmental Health*, 15: 57.
- Song, X.; Wang, S.; Hu, Y.; Yue, M.; Zhang, T.; Liu, Y.; Tian, J. und Shang, K. 2017. 'Impact of ambient temperature on morbidity and mortality: An overview of reviews', *Science of The Total Environment*, 586: 241-54.
- Soyiri, I. N.; Reidpath, D. D. und Sarran, C. 2013. 'Forecasting peak asthma admissions in London: an application of quantile regression models', *Int J Biometeorol*, 57: 569-78.
- Stach, A.; García-Mozo, H.; Prieto-Baena, J.; Czarnecka-Operacz, M.; Jenerowicz, D.; Silny, W. und Galán, C. 2007. 'Prevalence of *Artemisia* species pollinosis in western Poland: Impact of climate change on aerobiological trends', *J Investig Allergol Clin Immunol*, 17: 39-47.
- Stafoggia, M.; Schwartz, J.; Forastiere, F.; Perucci, C. A. und Group, S. 2008. 'Does temperature modify the association between air pollution and mortality? A multicity case-crossover analysis in Italy', *Am J Epidemiol*, 167: 1476-85.
- Steadman, R. G. 1984. 'A universal scale of apparent temperature', *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23: 1674-87.
- Stelmach, I.; Cichalewski, L.; Majak, P.; Smejda, K.; Podlecka, D.; Jerzynska, J. und Stelmach, W. 2016. 'School environmental factors are predictive for exercise-induced symptoms in children', *Respir Med*, 112: 25-30.
- Stensrud, T.; Berntsen, S. und Carlsen, K. H. 2006. 'Humidity influences exercise capacity in subjects with exercise-induced bronchoconstriction (EIB)', *Respir Med*, 100: 1633-41.

- Steppuhn, H.; Buda, S.; Wienecke, A.; Kraywinkel, K.; Tolksdorf, K.; Haberland, J.; Laußmann, D. und Scheidt-Nave, C. 2017a. 'Zeitliche Trends in der Inzidenz und Sterblichkeit respiratorischer Krankheiten von hoher Public-Health-Relevanz in Deutschland', *Journal of Health Monitoring*, 2: 33.
- Steppuhn, H.; Kuhnert, R. und Scheidt-Nave, C. 2017b. '12-Monats-Prävalenz der bekannten chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD) in Deutschland', *Journal of Health Monitoring*, 2(3): 46-52.
- Steppuhn, H.; Kuhnert, R. und Scheidt-Nave, C. 2017c. '12-Monats-Prävalenz von Asthma bronchiale bei Erwachsenen in Deutschland', *Journal of Health Monitoring*, 2(3): 36-45.
- Stevanović, I.; Jovašević-Stojanović, M. und Stošić, J. J. 2016. 'Association between ambient air pollution, meteorological conditions and exacerbations of asthma and chronic obstructive pulmonary disease in adult citizens of the town of Smederevo', *Vojnosanitetski preglad*, 73: 152-58.
- Stieb, D. M.; Szyszkowicz, M.; Rowe, B. H. und Leech, J. A. 2009. 'Air pollution and emergency department visits for cardiac and respiratory conditions: a multi-city time-series analysis', *Environ Health*, 8: 25.
- Stoupel, E. G.; Petrauskienė, J.; Kaledienė, R.; Sauliune, S.; Abramson, E. und Shochat, T. 2015. 'Space weather and human deaths distribution: 25 years' observation (Lithuania, 1989–2013)', *Journal of basic and clinical physiology and pharmacology*, 26: 433-41.
- Su, J. G.; Barrett, M. A.; Henderson, K.; Humblet, O.; Smith, T.; Sublett, J. W.; Nesbitt, L.; Hogg, C.; Van Sickle, D. und Sublett, J. L. 2017. 'Feasibility of Deploying Inhaler Sensors to Identify the Impacts of Environmental Triggers and Built Environment Factors on Asthma Short-Acting Bronchodilator Use', *Environ Health Perspect*, 125: 254-61.
- Sun, Z.; Chen, C.; Xu, D. und Li, T. 2018. 'Effects of ambient temperature on myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis', *Environmental Pollution*, 241: 1106-14.
- Szyszkowicz, M. 2007. 'Air pollution and emergency department visits for depression in Edmonton, Canada', *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 20: 241-45.
- Szyszkowicz, M.; Kousha, T.; Kingsbury, M. und Colman, I. 2016. 'Air pollution and emergency department visits for depression: a multicity case-crossover study', *Environmental health insights*, 10: EHI. S40493.
- Szyszkowicz, M.; Rowe, B. und Colman, I. 2009. 'Air pollution and daily emergency department visits for depression', *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 22: 355-62.

- Szyszkowicz, M. und Tremblay, N. 2011. 'Case-crossover design: air pollution and health outcomes', *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 24: 249.
- Thien, F.; Beggs, P. J.; Csutoros, D.; Darvall, J.; Hew, M.; Davies, J. M.; Bardin, P. G.; Bannister, T.; Barnes, S. und Bellomo, R. 2018. 'The Melbourne epidemic thunderstorm asthma event 2016: an investigation of environmental triggers, effect on health services, and patient risk factors', *The Lancet Planetary Health*, 2: e255-e63.
- Törö, K.; Dunay, G.; Bartholy, J.; Pongracz, R.; Kis, Z. und Keller, E. 2009. 'Relationship between suicidal cases and meteorological conditions', *J Forensic Leg Med*, 16: 277-9.
- Tosca, M. A.; Ruffoni, S.; Canonica, G. W. und Ciprandi, G. 2014. 'Asthma exacerbation in children: Relationship among pollens, weather, and air pollution', *Allergologia et Immunopathologia*, 42: 362-68.
- Traidl-Hoffmann, C. 2017. 'Allergie–eine Umwelterkrankung!', *Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz*, 60: 584-91.
- Trianti, S.-M.; Samoli, E.; Rodopoulou, S.; Katsouyanni, K.; Papiris, S. A. und Karakatsani, A. 2017. 'Desert dust outbreaks and respiratory morbidity in Athens, Greece', *Environmental Health*, 16: 72.
- Turner, L. R.; Connell, D. und Tong, S. 2013. 'The effect of heat waves on ambulance attendances in Brisbane, Australia', *Prehosp Disaster Med*, 28: 482-7.
- UBA. 2009. 'Feinstaubbelastung in Deutschland', *Hintergrundpapier Umweltbundesamt (Hrsg.)*.
- Vanos, J. K.; Hebborn, C. und Cakmak, S. 2014. 'Risk assessment for cardiovascular and respiratory mortality due to air pollution and synoptic meteorology in 10 Canadian cities', *Environmental Pollution*, 185: 322-32.
- Vardoulakis, S.; Dear, K.; Hajat, S.; Heaviside, C.; Eggen, B. und McMichael, A. J. 2014. 'Comparative assessment of the effects of climate change on heat-and cold-related mortality in the United Kingdom and Australia', *Environmental Health Perspectives*, 122: 1285-92.
- Vautard, R.; Gobiet, A.; Jacob, D.; Belda, M.; Colette, A.; Déqué, M.; Fernández, J.; García-Díez, M.; Goergen, K. und Güttler, I. 2013. 'The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project', *Climate Dynamics*, 41: 2555-75.
- Vert, C.; Sánchez-Benavides, G.; Martínez, D.; Gotsens, X.; Gramunt, N.; Cirach, M.; Molinuevo, J. L.; Sunyer, J.; Nieuwenhuijsen, M. J.; Crous-Bou, M. und Gascon, M. 2017. 'Effect of long-term

- exposure to air pollution on anxiety and depression in adults: A cross-sectional study', *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220: 1074-80.
- Vida, S.; Durocher, M.; Ouarda, T. B. und Gosselin, P. 2012. 'Relationship between ambient temperature and humidity and visits to mental health emergency departments in Quebec', *Psychiatric Services*, 63: 1150-53.
- Villeneuve, P. J.; Leech, J. und Bourque, D. 2005. 'Frequency of emergency room visits for childhood asthma in Ottawa, Canada: the role of weather', *Int J Biometeorol*, 50: 48-56.
- Vyssoki, B.; Kapusta, N. D.; Praschak-Rieder, N.; Dorffner, G. und Willeit, M. 2014. 'Direct effect of sunshine on suicide', *JAMA psychiatry*, 71: 1231-37.
- Vyssoki, B.; Praschak-Rieder, N.; Sonneck, G.; Blüml, V.; Willeit, M.; Kasper, S. und Kapusta, N. D. 2012. 'Effects of sunshine on suicide rates', *Comprehensive psychiatry*, 53: 535-39.
- Walton, N. A.; Poynton, M. R.; Gesteland, P. H.; Maloney, C.; Staes, C. und Facelli, J. C. 2010. 'Predicting the start week of respiratory syncytial virus outbreaks using real time weather variables', *BMC Med Inform Decis Mak*, 10: 68.
- Wang, H. C. und Yousef, E. 2007. 'Air quality and pediatric asthma-related emergencies', *J Asthma*, 44: 839-41.
- Wang, Q.; Li, C.; Guo, Y.; Barnett, A. G.; Tong, S.; Phung, D.; Chu, C.; Dear, K.; Wang, X. und Huang, C. 2017. 'Environmental ambient temperature and blood pressure in adults: A systematic review and meta-analysis', *Science of The Total Environment*, 575: 276-86.
- Wanka, E. R.; Bayerstadler, A.; Heumann, C.; Nowak, D.; Jorres, R. A. und Fischer, R. 2014. 'Weather and air pollutants have an impact on patients with respiratory diseases and breathing difficulties in Munich, Germany', *Int J Biometeorol*, 58: 249-62.
- Wasilevich, E. A.; Rabito, F.; Lefante, J. und Johnson, E. 2012. 'Short-term outdoor temperature change and emergency department visits for asthma among children: a case-crossover study', *Am J Epidemiol*, 176 Suppl 7: S123-30.
- Welliver, R. 2009. 'The relationship of meteorological conditions to the epidemic activity of respiratory syncytial virus', *Paediatric Respiratory Reviews*, 10: 6-8.
- Werchan, B.; Werchan, M.; Mücke, H.-G. und Bergmann, K.-C. 2018. 'Spatial distribution of pollen-induced symptoms within a large metropolitan area—Berlin, Germany', *Aerobiologia*, 34: 539-56.
- White, R.; Azrael, D.; Papadopoulos, F.; Lambert, G. und Miller, M. 2015. *Does suicide have a stronger association with seasonality than sunlight?*

- WHO. 2015. *International statistical classification of diseases and related health problems* (World Health Organization: Genf, Schweiz).
- Wichmann, J.; Andersen, Z.; Ketzel, M.; Ellermann, T. und Loft, S. 2011. 'Apparent Temperature and Cause-Specific Emergency Hospital Admissions in Greater Copenhagen, Denmark', *PLoS One*, 6.
- Wiemken, T. L.; Mattingly, W. A.; Furmanek, S. P.; Guinn, B. E.; English, C. L.; Carrico, R.; Peyrani, P. und Ramirez, J. A. 2017. 'Impact of temperature relative humidity and absolute humidity on the incidence of hospitalizations for lower respiratory tract infections due to influenza, rhinovirus, and respiratory syncytial virus: results from Community-Acquired Pneumonia Organization (CAPO) International Cohort Study', *Journal of Respiratory Infections*, 1.
- Williams, M. N.; Hill, S. R. und Spicer, J. 2015. 'Will climate change increase or decrease suicide rates? The differing effects of geographical, seasonal, and irregular variation in temperature on suicide incidence', *Climatic Change*, 130: 519-28.
- Williams, M. N.; Hill, S. R. und Spicer, J. 2016. 'Do hotter temperatures increase the incidence of self-harm hospitalisations?', *Psychology, health & medicine*, 21: 226-35.
- Williams, S.; Nitschke, M.; Sullivan, T.; Tucker, G. R.; Weinstein, P.; Pisaniello, D. L.; Parton, K. A. und Bi, P. 2012. 'Heat and health in Adelaide, South Australia: Assessment of heat thresholds and temperature relationships', *Science of The Total Environment*, 414: 126-33.
- Winqvist, A.; Grundstein, A.; Chang, H. H.; Hess, J. und Sarnat, S. E. 2016. 'Warm season temperatures and emergency department visits in Atlanta, Georgia', *Environ Res*, 147: 314-23.
- Wolf, K.; Schneider, A.; Breitner, S.; von Klot, S.; Meisinger, C.; Cyrus, J.; Hymer, H.; Wichmann, H.-E. und Peters, A. J. C. 2009. 'Air temperature and the occurrence of myocardial infarction in Augsburg, Germany', 120: 735-42.
- Wolff, M.; Haase, A. und Leibert, T. 2020. 'Mehr als Schrumpfung und Wachstum? Trends der demographischen Raumentwicklung in Deutschland nach 2011'.
- Wu, J.; Zhou, Y.; Gao, Y.; Fu, J. S.; Johnson, B. A.; Huang, C.; Kim, Y.-M. und Liu, Y. 2014. 'Estimation and uncertainty analysis of impacts of future heat waves on mortality in the eastern United States', *Environmental Health Perspectives*, 122: 10-16.
- Yamagata, Y.; Hanasaki, N.; Ito, A.; Kinoshita, T.; Murakami, D. und Zhou, Q. 2018. 'Estimating water–food–ecosystem trade-offs for the global negative emission scenario (IPCC-RCP2.6)', *Sustainability Science*, 13: 301-13.

- Yang, T.-C.; Wu, P.-C.; Chen, V. Y.-J. und Su, H.-J. 2009. 'Cold surge: a sudden and spatially varying threat to health?', *Science of The Total Environment*, 407: 3421-24.
- Youssef-Agha, A. H.; Lohrmann, D. K.; Jayawardene, W. P. und El Afandi, G. S. 2012. 'Upper-air observation indicators predict outbreaks of asthma exacerbations among elementary school children: integration of daily environmental and school health surveillance systems in Pennsylvania', *J Asthma*, 49: 464-73.
- Yu, W.; Guo, Y.; Ye, X.; Wang, X.; Huang, C.; Pan, X. und Tong, S. 2011. 'The effect of various temperature indicators on different mortality categories in a subtropical city of Brisbane, Australia', *Sci Total Environ*, 409: 3431-7.
- Zacharias, S. 2012. 'Literaturstudie zum Einfluss des Wetters auf die menschliche Gesundheit', *Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238*.
- Zacharias, S. und Koppe, C. 2014. 'Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten von ischämischen Herzerkrankungen (ICD Code: I20 - I25) in Deutschland. Anlage 4.', *Bericht zum Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes UFOPLAN 3711 61 238*.
- Zacharias, S. und Koppe, C. 2015. "Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland." *Umwelt & Gesundheit 06/2015*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Zanobetti, A.; O'neill, M. S.; Gronlund, C. J. und Schwartz, J. D. 2012. 'Summer temperature variability and long-term survival among elderly people with chronic disease', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109: 6608-13.
- Zanolin, M. E.; Pattaro, C.; Corsico, A.; Bugiani, M.; Carrozzi, L.; Casali, L.; Dallari, R.; Ferrari, M.; Marinoni, A.; Migliore, E.; Olivieri, M.; Pirina, P.; Verlato, G.; Villani, S. und Marco, R. 2004. 'The role of climate on the geographic variability of asthma, allergic rhinitis and respiratory symptoms: results from the Italian study of asthma in young adults', *Allergy*, 59: 306-14.
- Zeka, A.; Browne, S.; McAvoy, H. und Goodman, P. 2014. 'The association of cold weather and all-cause and cause-specific mortality in the island of Ireland between 1984 and 2007', *Environ Health*, 13: 104.
- Zhan, Z.; Zhao, Y.; Pang, S.; Zhong, X.; Wu, C. und Ding, Z. 2017. 'Temperature change between neighboring days and mortality in United States: A nationwide study', *Science of The Total Environment*, 584: 1152-61.
- Zijlema, W. L.; Wolf, K.; Emeny, R.; Ladwig, K. H.; Peters, A.; Kongsgård, H.; Hveem, K.; Kvaløy, K.; Yli-Tuomi, T.; Partonen, T.; Lanki, T.; Eeftens, M.; de Hoogh, K.; Brunekreef, B.; Stolk, R. P. und Rosmalen, J. G. M. 2016. 'The association of air pollution and depressed mood in

70,928 individuals from four European cohorts', *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219: 212-19.

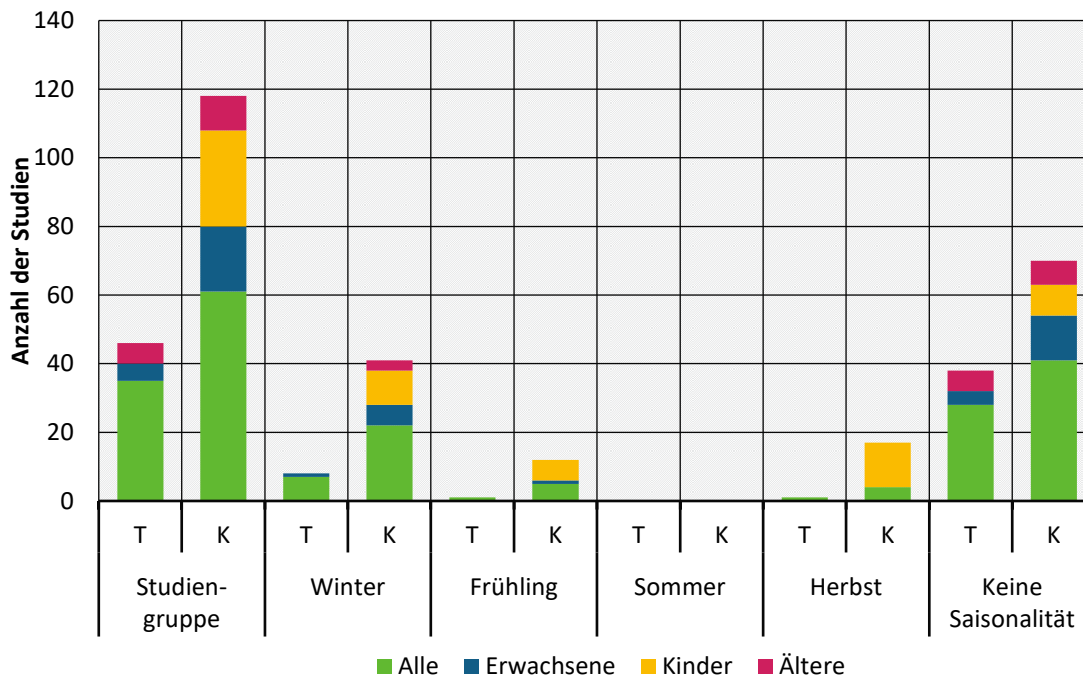
Zittermann, A. und Gummert, J. F. 2010. 'Sun, vitamin D, and cardiovascular disease', *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 101: 124-29.

A Anhang

A.1 Anhang zur Literaturstudie

A.1.1 Anhänge zur Literaturstudie über Atemwegserkrankungen

Abbildung A 1: Studien zur Saisonalität von Atemwegserkrankungen (2001 – 2018) angegeben als sign. erhöhte Mortalität/Morbidität im Vergleich zum Gesamtjahr, unterteilt in verschiedene Altersgruppen der Studienteilnehmer.



Erläuterungen: T, Mortalität (Todesfall); K, Morbidität (krank). Quelle: eigene Abbildung, DWD.

Tabelle A 1: Mortalitätsstudien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und der Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen.

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | RH | AH |
|---|-----------------------------|-------------------------|------------|------------------------------|----------------|----|
| Fernandez-Raga et al. (2010) | Spanien (Castile-Leon) | 1980 – 1998 (k. A.) | Ökologisch | AK; Alle | s+ (Opt. 24 %) | |
| Linares et al. (2015) + Miron et al. (2015) | Spanien (Castile-La Mancha) | 1975 – 2008 (53 363) | Ökologisch | AK; Alle | s- | |
| Röcklöv et al. (2009) | Schweden (Stockholm) | 1990 – 2002 (1 560 000) | Ökologisch | AK; Alle | s+ | |
| Braga et al. (2002) | USA | 1986 – 1993 (131 400) | Ökologisch | COPD; Alle | Δ RH ns | |

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | RH | AH |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------------------------|----|-----------------------|
| Barreca und Shimshack (2012) | USA | 1973 – 2002 (129 240) | Ökologisch | Influenza; Alle | | s- spez. F < 6 g/kg |
| Davis et al. (2016) | Neuseeland (Auckland) | 1980 – 2009 (369) | Ökologisch | Influenza, Pneumonie; Alle | | s- geringe Td + Kälte |
| Davis et al. (2012) | USA (New York City) | 1975 – 2002 (817) | Ökologisch | Influenza, Pneumonie; Alle | | s- Td |

Erläuterungen: RH, relative Feuchte; AH, absolutes Feuchtemaß; s+, positive Korrelation; s- negative Korrelation; ns, nicht signifikante Korrelation; Td, Taupunkttemperatur; Δ RH Änderung der relativen Feuchte; spez.F., spezifische Feuchte; COPD, chronische obstruktive Lungenerkrankung; Opt., Optimum.

Tabelle A 2: Studien (2001 – 2018) mit einer Angabe über den Zusammenhang zwischen sowohl relativer Feuchte (RH) als auch absoluter Feuchte (AH) mit der Morbidität aufgrund von Atemwegserkrankungen.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | Morbidität | Zeitl. Auflösung | Max. Saison | RH | AH |
|------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------------------|-------------|------------------|-------------|----|----|
| Hervás et al. (2015) | Spanien (Mallorca) | 2007 - 2011 (371) | Ökologisch | Asthma; Kinder 5-14 J. | Notaufnahme | Monatsmittel | F, H | s+ | s- |
| Nastos und Matzarakis (2006) | Griechenland (Athen) | 2002 (1 212) | Ökologisch | ARI; Alle | Arzt | 1 Tag | W, F | ns | s+ |
| Nastos et al. (2008) | Griechenland (Athen) | 1978 - 2000 (14 000) | Ökologisch | Asthma; Kinder 0-14 J. | KH-Aufnahme | Monatsmittel | W, F, H | s+ | s- |
| Priftis et al. (2006) | Griechenland (Athen) | 1978 - 2000 (25 412) | Ökologisch | Asthma; Kinder 0-14 J. | KH-Aufnahme | Monatsmittel | W, F, H | s+ | s- |
| Tosca et al. (2014) | Italien (Genua) | 2002 - 2011 (434) | Ökologisch | Asthma; Kinder 0-17 J. | Notfall | Monatsmittel | F, H | s- | s- |
| Wiemken et al. (2017) | USA KY (Louisville) | 2010 - 2012 (467) | Case cross-over | LRTI; Alle | KH-Aufnahme | Wintersaison | W | ns | s- |

Erläuterungen: RH, relative Feuchte; AH, absolutes Feuchtemaß; s+, positive Korrelation; s- negative Korrelation; ns, nicht signifikante Korrelation, F, Frühling; H, Herbst; W, Winter; ARI, akute Atemwegsinfektionen; LRTI, untere Atemwegsinfektionen.

Tabelle A 3: Morbiditätsstudien (2001 – 2018) mit Fallzahl > 1000 mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftbeimengungen wie Partikeln, Gasen und Pollen und Atemwegserkrankungen.

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | PM10; PM2,5 | NO ₂ ; CO | SO ₂ ; O ₃ | Pollen |
|---|---|-------------------------|----------------------|--|-------------|----------------------|----------------------------------|--------|
| Alves und Ferraz (2005) | Portugal (Porto) | 2005 (3 763) | Ökologisch | COPD; Alle | | | s+; - | |
| Anderson et al. (2013) | USA | 1999 – 2008 (1 141 458) | Ökologisch | AK, COPD, RTI; Ältere 65+ | ns; ns | | -; ns | |
| Ayres-Sampaio et al. (2014) | Portugal (urban/ländlich) | 2003 - 2008 (18 409) | Ökologisch | Asthma; Alle | ns; - | s+; | | |
| Brzezinska-Pawlowska et al. (2016) | Polen (Lodz) | 2007 - 2008 (7 735) | Ökologisch | AK, Asthma, COPD; Alle | | | | ns |
| Byers et al. (2016) | USA (Indianapolis) | 2007 – 2011 (165 056) | Ökologisch | Asthma; Alle (o.K.K.) | | | s+ w.J.; s+ w.J. | |
| de Marco et al. (2002), Zanolin et al. (2004) | Italien | 1998 – 2002 (18 873) | Querschnitt | Asthma, llerg. Rhinitis; Erwachsene 20-44 J. | | s+ w.R.; - | | |
| Islam et al. (2017) | Großbritannien (London) | 2000 – 2009 (31 599) | Ökologisch | LRD; Alle | s+; - | | | |
| Mazenq et al. (2017a) | Frankreich (Bouches-deRhône) | 2013 (1 182) | Fall-Kontroll-Studie | Asthma; Kinder 3-18 J. | s+; ns | | | ns |
| Mazenq et al. (2017b) | Frankreich (Provence-Alpes-Côte-d'Azur) | 2013 (6 250) | Fall-Kontroll-Studie | Asthma; Alle | | s+ | | ns |
| Mentzakis und Delfino (2010) | Griechenland (Athen) | 1987 – 1999 (1 051 200) | Ökologisch | AK; Alle | | s+; - | -; s+ | |
| Mirabelli et al. (2016) | USA | 2006 – 2010 (50 000) | Querschnitt | Asthma, Erwachsene 18+ | -; s+ | | | |
| Mireku et al. (2009) | USA (Michigan) | 2004 – 2005 (25 401) | Ökologisch | Asthma; Kinder 1-18 J. | | s+; - | s+; - | |
| Mohr et al. (2008) | USA (St. Louis) | 2001 – 2003 (12 836) | Ökologisch | Asthma; Kinder 2-17 J. | EC s+ (S) | s+ (H/F); - | ns; s+ (F) | |

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Altersgruppe | PM10; PM2,5 | NO ₂ ; CO | SO ₂ ; O ₃ | Pol-len |
|--------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------|------------------------------|-------------|----------------------|----------------------------------|---------|
| Monsalve (2013) | Spanien (Castilla-La Mancha) | 2000 – 2006 (12 9910) | Ökologisch | AK; Alle, Ältere | | s+; s+ | s+; s- | |
| Ren et al. (2006) | Australien (Brisbane) | 1996 – 2001 (112 894) | Ökologisch | AK; Alle | s+; - | | | |
| Santus et al. (2012) | Italien (Mailand) | 2007 – 2008 (45 770) | Case cross-over | URTI Alle | ns; ns | s+ k.J.; s+ k.J. | s+ k.J.; s+ k.J. | |
| Soyiri et al. (2013) | Großbritannien (London) | 2005 – 2006 (20 805) | Ökologisch | Asthma; Alle | s+; - | s+; s+ | -; s- | |
| Stach et al. (2007) | Polen (Poznan) | 1995 – 2004 (1 180) | Ökologisch | Pollenallergie; Alle | | | | s+ |
| Stevanović et al. (2016) | Serbien (Smederevo) | 2011 (1 624) | Ökologisch | Asthma, OPD; Erwachsene 18+ | s+; s+ | | | |
| Trianti et al. (2017) | Griechenland (Athen) | 2001 – 2006 (13 685) | Ökologisch | AK; Erwachsene 18+ | s+; - | | | |
| Wanka et al. (2014) | Deutschland (München) | 2006 – 2007 (2.1 Mio.) | Ökologisch | AK, Asthma, COPD; Alle | s+ / s-; - | s+; s- | -; s- | |

Erläuterungen: s+, signifikant positive Korrelation; s-, signifikant negative Korrelation; ns, nicht-signifikante Korrelation; k.J., gilt nur in der kalten Jahreszeit; w.J., gilt nur in der warmen Jahreszeit; PM10, Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$; PM2,5, Partikel mit einem Durchmesser $\leq 2,5 \mu\text{m}$; NO₂, Stickstoffdioxid; CO, Kohlenmonoxid; SO₂, Schwefeldioxid; O₃, Ozon; EC, elementarer Kohlenstoff; TSP, Gesamtstaub; S, Sommer; H, Herbst; F, Frühling.

A.1.2 Anhänge zur Literaturstudie über psychische Störungen

Tabelle A 4: Studien (2001 – 2018) zum saisonalen Auftreten von Suiziden, Suizidversuchen und weiteren Todesfällen aufgrund psychischer Erkrankungen.

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Todesursache, Suizidversuch | Max. im Jahr | Min. im Jahr |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| Bakian et al. (2015) | USA (Salt-Lake County) | 2000 - 2010 (1 546) | Case cross-over | Suizid | F, H | |
| Biermann et al. (2009) | Deutschland (Mittelfranken) | 2004 - 2007 (1 928) | Ökologisch | Suizid, Suizidversuch | S | |
| Casas et al. (2017) | Belgien | 2002 - 2011 (20 533) | Case cross-over | Suizid | F, S | |
| Deisenhammer et al. (2003) | Österreich (Tirol) | 1995 - 2005 (702) | Ökologisch | Suizid | Mai | März |

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Todesursache, Suizidversuch | Max. im Jahr | Min. im Jahr |
|----------------------------|---|----------------------------|------------|--|--------------|--------------|
| Dixon und Kalkstein (2018) | USA | 1975 - 2010 (k. A.) | Ökologisch | Suizid | F, S | |
| Gajić et al. (2011) | Serbien (Kragujevac) | 2004 - 2008 (144) | Ökologisch | Suizid | Jan, Juli | Aug |
| Grijbovski et al. (2013) | Kasachstan (Astana) | 2005 - 2010 (685) | Ökologisch | Suizid | F, S | |
| (Hanigan et al. 2012) | Australien (New South Wales) | 1970 - 2007 (k. A.) | Ökologisch | Suizid | F, fS | |
| (Hiltunen et al. 2011) | Finnland | 1969 - 2003 (43 393) | Ökologisch | Suizid | F, S | |
| (Hiltunen et al. 2014) | Finnland | 1974 - 2010 (10 802) | Ökologisch | Suizid | F, S | |
| Kordić et al. (2010) | Bosnien-Herzegowina (Mostar) | 2003 - 2006 (89) | Ökologisch | Suizid, Suizidversuch | April | |
| Lambert et al. (2003) | Australien (Victoria) | 1990 - 1999 (5 706) | Ökologisch | Suizid | F, S | W |
| Makris et al. (2016) | Schweden | 1992 - 2003 (12 448) | Ökologisch | Suizid mit vorh. Antidepressiva-Einnahme | F, S | |
| Moore et al. (2018) | Schottland (gesamtes Land/ Brücke bei Dundee) | 2003 - 2013 (k. A.)/ (685) | Ökologisch | Suizidales Verhalten | ns/ Juni | ns |
| Morken et al. (2002) | Norwegen | 1969 - 1996 (14 503) | Ökologisch | Suizid | April | W |
| Müller et al. (2011) | Deutschland (Mittelfranken) | 1998 - 2005 (2 987) | Ökologisch | Suizid, Suizidversuch | F, S | Nov, Feb |
| Nahmias et al. (2017) | USA (Springfield, MA) | 2010 - 2015 (181) | Ökologisch | Suizid | F | W |
| Page et al. (2007) | Großbritannien (Wales) | 1993 - 2003 (53 460) | Ökologisch | Suizid | Jan | Nov-Dez |
| Page et al. (2012) | Großbritannien (England) | 1998 - 2007 (22 562) | Ökologisch | Psychose, Demenz, Sucht | W | |
| Papadopoulos et al. (2005) | Griechenland | 1992 - 2001 (3 717) | Ökologisch | Suizid | fS | |
| Partonen et al. (2004) | Finnland (Oulu) | 1987 - 1999 (1 658) | Ökologisch | Suizid | F, H | |

| Referenz | Land (Region) | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Todesursache, Suizidversuch | Max. im Jahr | Min. im Jahr |
|------------------------|------------------------------------|--|------------|-----------------------------|--------------------|--------------|
| Petridou et al. (2002) | Weltweit | 4 – 24 Jahre (k. A.) | Ökologisch | Suizid | Juni (Dez auf SHK) | |
| Qi et al. (2015) | Australien | 1985 - 2005 (2 8501) | Ökologisch | Suizid | F, S | |
| Stoupe et al. (2015) | Litauen | 1989 - 2013 (33 072) | Ökologisch | Suizid | ns | |
| Törö et al. (2009) | Ungarn (Budapest) | 1995 - 2004 (4 918) | Ökologisch | Suizid | F, fs | H |
| Vyssoki et al. (2012) | Österreich | 1996 - 2006 (16 673) | Ökologisch | Suizid | F, S | W |
| Vyssoki et al. (2014) | Österreich | 1970 - 2010 (69 462) | Ökologisch | Suizid | F, S | W |
| White et al. (2015) | Norwegen, Australien, Griechenland | 1992 - 2001 1990 - 1998 1969 - 2009 (insg. 31 060) | Ökologisch | Suizid | F, S | W |

Erläuterungen: F, Frühling; fs, Frühsommer; S, Sommer; H, Herbst; W, Winter; SHK, Südhalbkugel.

Tabelle A 5: Studien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftfeuchte, Niederschlag, Luftdruck und dem Auftreten von Symptomen psychischer Störungen.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Morbidität / Mortalität | Luftfeuchte | Niederschlag | Luftdruck |
|---------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|---|-------------|--------------|-----------|
| Bauer et al. (2009) | Weltweit | 2002 – 2006 (360) | Sonstiges | Bipolare Störung; Stimmung | | ns | |
| Brandl et al. (2018) | Deutschland (Berlin) | 2008 – 2014 (22 672) | Ökologisch | Psych. Störungen; Notaufnahme | | | s- |
| Bulbena et al. (2005) | Spanien (Barcelona) | 2002 (368) | Ökologisch | Panik, Angst; Notaufnahme | RH: ns | ns | ns |
| Bullock et al. (2017) | Australien (Victoria) | k. A. (11) | Sonstiges | Bipolare Störung Symptome | RH: ns | | s- |
| Christensen et al. (2008) | Dänemark (Kopenhagen) | 1990 – 1993 (56) | Sonstiges | Bipolare Störung; KH-Aufnahme | RH: ns | ns | ns |
| Denissen et al. (2008) | Deutschland | k. A. (1 233) | Querschnitt | Negative Stimmung | | s+ | |
| Ding et al. (2016) | Australien (New South Wales) | 2006 – 2008 (53 144) | Sonstiges | Depressionen, Angst; Symptome, Behandlung | VP: s+ >99P | | |

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Morbidität / Mortalität | Luftfeuchte | Niederschlag | Luftdruck |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------|---------------|---|-----------------|--------------|-----------|
| García et al. (2009) | Spanien (Tarragona) | 2003 – 2005 (3 048) | Ökologisch | Psych. Störungen; Noraufnahme + KH | RH: s- / s+ | | |
| Hakkarainen et al. (2003) | Finnland | 1998 - 1999, 2002 (67) | Kohort-Studie | Bipolare Störung; KH-Aufnahme | | s+ | |
| Henríquez-Sánchez et al. (2014) | Spanien | 1999 – 2009 (13 938) | Kohort-Studie | Depressionen; Arzt-Besuch | | s- | |
| Huibers et al. (2010) | Süd-Niederlande | 2005 – 2006 (14 478) | Querschnitt | Depression; Symptome | | ns | |
| Kerr et al. (2013) | USA (Westen) | 1980 – 1999 (8 316) | Kohort-Studie | Depressionen; Symptome | VP: ns | ns | ns |
| McWilliams et al. (2013) | Irland | 1971 – 2002 (48 347) | Ökologisch | Psych. Störungen; KH-Aufnahme | | ns | s+ |
| McWilliams et al. (2014) | Irland | 1971 – 2002 (34 465) | Ökologisch | Affektive Störung; KH-Aufnahme | | ns | s+ |
| Medici et al. (2016) | Dänemark | 1995 – 2012 (24 313) | Kohort-Studie | Manie; KH-Aufnahme | | ns, s-Schnee | |
| O’Hare et al. (2016) | Irland | 2009 – 2011 (8 027) | Sonstiges | Depressionen; Stimmung | | s+ | |
| Murage et al. (2017) | Großbritannien (London) | 1993 – 2015 (25 185) | Ökologisch | Psych. Störungen; Mortalität | VP: s+ Nacht | | |
| Parker et al. (2017) | Australien (New South Wales) | 2000 – 2014 (21 882) | Ökologisch | Manie; KH-Aufnahme | Verdunstung: s+ | | |
| Pandey et al. (2005) | USA (Rochester) | (k. A.) (43) | Sonstiges | Schlaf; Symptome | | s+ | s- |
| Radua et al. (2010) | Spanien (Barcelona) | 1997 – 2004 (421) | Ökologisch | Depression; KH-Aufnahme | | | s- |
| Schory et al. (2003) | Kanada (Louisville) | 2008 – 2014 (4 717) | Ökologisch | Psych. Erkrankungen, Gewalttaten; Notaufnahme | | | |
| Vida et al. (2012) | Kanada (Quebec) | 1995 – 2007 (647 552) | Ökologisch | Psych. Störungen; Notaufnahme | RH: s+ | | |

Erläuterungen: RH, relative Feuchte; VP, Wasserdampfdruck; s+, signifikant positive Korrelation; s-, signifikant negative Korrelation; M, Männer; W, Frauen.

Tabelle A 6: Studien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang zwischen Luftfeuchte, Niederschlag, Luftdruck und suizidalem Verhalten.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Studien-design | Krankheitsbild; Morbidität / Mortalität | Luftfeuchte | Niederschlag | Luftdruck |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------|---|-------------|--------------|--------------|
| Ajdacic-Gross et al. (2006) | Schweiz | 1977 – 2000 (128 322) | Ökologisch | Suizid | | ns | |
| Deisenhammer et al. (2003) | Österreich (Tirol) | 1995 – 2005 (702) | Ökologisch | Suizid | RH: s- | ns | ns |
| Hiltunen et al. (2012) | Finland (Helsinki) | 1989/90, 1997/98 (3 945) | Ökologisch | Suizidversuche | | | s- M s+ W |
| Kordić et al. (2010) | Bosnien-Herzegowina (Mostar) | 2003 – 2006 (89) | Ökologisch | Suizid, Suizidversuch | RH: ns | | s+ |
| Moore et al. (2018) | Schottland | 1968 – 2013 (k. A.) | Ökologisch | Suizidales Verhalten | | ns | |
| Moore et al. (2018) | Schottland (Dundee) | 1968 – 2007 (685) | Ökologisch | Suizid | | ns | |
| Partonen et al. (2004) | Finnland (Oulu) | 1987 – 1999 (1 658) | Ökologisch | Suizid | | s- | ns |
| Qi et al. (2015) | Australien | 1985 – 2005 (28 501) | Ökologisch | Suizid; Mortalität | VP: s+ | | |
| Ruuhela et al. (2009) | Finnland | 1971 – 2003 (43 393) | Ökologisch | Suizid | | s- | |
| Törö et al. (2009) | Ungarn (Budapest) | 1995 – 2004 (4 918) | Ökologisch | Suizid | RH: s- | | |

Erläuterungen: RH, relative Feuchte; VP, Wasserdampfdruck; s+, signifikant positive Korrelation; s-, signifikant negative Korrelation; M, Männer; W, Frauen.

Tabelle A 7: Studien (2001 – 2018) mit Angaben zum Zusammenhang von Luftbeimengungen und dem Auftreten von psychischen Störungen.

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Morbidität / Mortalität | PM10; PM2,5 | NO ₂ ; SO ₂ | CO; O ₃ |
|------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------|---|-------------|-----------------------------------|--------------------|
| Bakian et al. (2015) | USA (Salt-Lake County) | 2000 – 2010 (1 546) | Case cross-over | Suizid | s+ | s+ s+ | |
| Biermann et al. (2009) | Deutschland (Mittelfranken) | 2004 – 2007 (1 928) | Ökologisch | Suizid, Suizidversuche | | | - s+ |
| Casas et al. (2017) | Belgien | 2002 – 2011 (20 533) | Case cross-over | Suizid | s+ w.J. | | - s+ |

| Referenz | Land | Zeitraum (Fallzahl) | Design | Krankheitsbild; Morbidität / Mortalität | PM10; PM2,5 | NO ₂ ; SO ₂ | CO; O ₃ |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Mehta et al. (2015) | USA (Greater Boston Area) | 1995 – 2007 (2 244) | Kohortstudie | Psych. Stress; Stresslevel | - s+ | s+ - | - ns |
| Power et al. (2015) | USA | 1988 – 2003 (71 271) | Kohortstudie | Angst; Selbst-Angabe | - s+ | | |
| Pun et al. (2017) | USA | 2005/06, 2010/11 (4 008) | Kohortstudie | Angst, Depressionen; Symptome | - s+ | | |
| Szyszkowicz (2007) | Kanada (Edmonton) | 1992 – 2002 (15 556) | Ökologisch | Depressionen; Notaufnahme | s+ k.J.; s+ k.J. | s+ w.J. W; s+ w.J. W | s+ w.J. W; s+ w.J. W |
| Szyszkowicz et al. (2009) | Kanada (6 Städte) | 1992 – 2002 (27 047) | Ökologisch | Depressionen; Notaufnahme | s+ - | s+ s+ | s+ - |
| Szyszkowicz et al. (2016) | Kanada | 2004 – 2011 (118 602) | Case cross-over | Depressionen; Notaufnahme | s+ M - | - s+ W | - s+ |
| Szyszkowicz und Tremblay (2011) | Kanada | 1993 – 2002 (k. A.) | Case cross-over | Depressionen; Notaufnahme | | s+ s+ | |
| Vert et al. (2017) | Spanien (Barcelona) | 2009 – 2014 (958) | Querschnitt | Depressionen, Angst; Selbst-Angabe | s+ - | s+ - | |
| Williams et al. (2012) | Australien (Adelaide) | 1993 – 2009 (k. A.) | Ökologisch | Psych. Störungen; Notaufnahme + KH | s+ - | | - s+ |
| Zijlema et al. (2016) | Europa (De, Nor, Nied, Fin) | 2008 – 2011 (70 928) | Kohortstudie | Depressionen; Symptome | s+ Nie, s- Nor ns De, Fin | s+ Nie, s- Nor, ns De, Fin | |

Erläuterungen: s+, signifikant positive Korrelation; s-, signifikant negative Korrelation; M, gilt nur für Männer; W, gilt nur für Frauen; w.J. gilt nur in der warmen Jahreszeit; k.J., gilt nur in der kalten Jahreszeit; Nie, Niederlande; Nor, Norwegen; De, Deutschland; Fin, Finnland.

A.2 Anhang zu den Ergebnissen

A.2.1 Anhänge zur Retrospektive Analyse

Tabelle A 8: Schwellenwerte, Minimum und Steigung des Relativen Risikos der Mortalität von chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) berechnet basierend auf dem Humidex (H) als Temperaturindex.

| Region | Unterer Schwellenwert (SWu) [°C H] | Minimum von RR | Humidex bei minimalem RR | Oberer Schwellenwert (SWo) [°C H] | Steigung oberhalb des SWo [%/ °C H] |
|-------------|------------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Deutschland | -9,9 | 0,95 | 15,0 | 19,8 | 2,6 |
| Nord | 1,0 | 0,92 | 11,5 | 17,9 | 2,2 |
| Nord-West | - | 0,96 | 11,9 | 20,2 | 2,2 |
| West | - | 0,95 | 15,1 | 22,4 | 3,0 |
| Mitte | 5,2 | 0,95 | 11,6 | 22,5 | 2,7 |
| Süd-West | 7,6 | 0,94 | 13,9 | 23,6 | 3,3 |
| Süd-Ost | -3,2 | 0,96 | 7,5 | 22,4 | 2,0 |
| Ost | 0,1 | 0,95 | 15,4 | 20,8 | 1,1 |

Erläuterungen: H, Humidex; RR, Relatives Risiko; SWo, oberer Schwellenwert der Lufttemperatur; SWu, unterer Schwellenwert der Lufttemperatur.

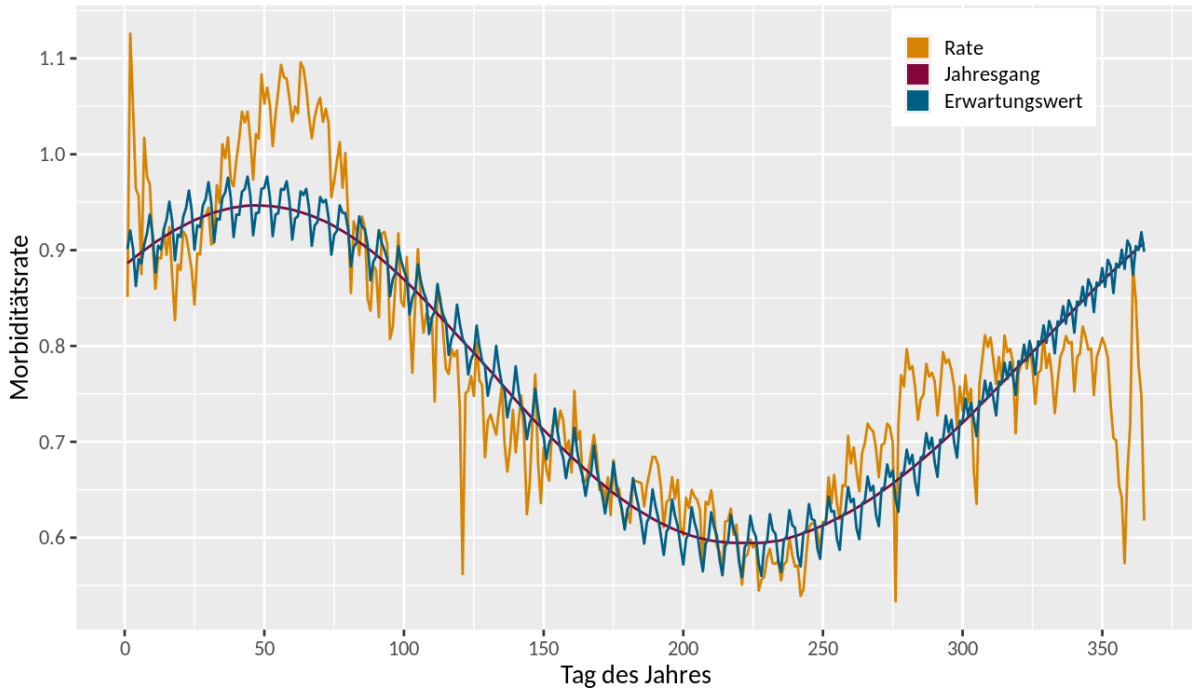
Tabelle A 9: Untere (SWu) und obere (SWo) Schwellenwerte der Lufttemperatur (jeweils Tagesmittelwert in °C) für die das Relative Risiko der Mortalität aufgrund von ischämischen Herzerkrankungen (unterteilt in Untergruppen) über den Erwartungswert steigt und Steigungen von RR oberhalb der SWo.

| Region | ICD-10-Code und Geschlecht | SWu [°C] | SWo [°C] | Steigung oberhalb SWo [%/°C T _a] | ICD-Gruppe und Geschlecht | SWu [°C] | SWo [°C] | Steigung oberhalb SWo [%/°C T _a] |
|--------------------|----------------------------|----------|----------|--|---------------------------|----------|----------|--|
| Deutschland | I20-I25 G | 2,1 | 17,6 | 2,6 | | | | |
| Nord | I20-I25 G | 1,1 | 20,0 | 2,8 | | | | |
| Nord-West | I20-I25 G | 2,0 | 17,7 | 1,7 | | | | |
| West | I20-I25 G | 2,6 | 18,5 | 2,7 | | | | |
| Mitte | I20-I25 G | 4,1 | 19,0 | 1,7 | | | | |
| Süd-West | I20-I25 G | 0,1 | 19,9 | 1,9 | | | | |
| Süd-Ost | I20-I25 G | -0,2 | 16,9 | 1,2 | | | | |
| Ost | I20-I25 G | -2,6 | 20,4 | 1,8 | | | | |
| Deutschland | I20-I25 F | 1,9 | 17,0 | 2,8 | I20-I25 M | 3,9 | 17,8 | 2,7 |

| Region | ICD-10-Code und Geschlecht | SWu [°C] | SWo [°C] | Steigung oberhalb SWo [%/°C T _a] | ICD-Gruppe und Geschlecht | SWu [°C] | SWo [°C] | Steigung oberhalb SWo [%/°C T _a] |
|-------------|----------------------------|----------|----------|--|---------------------------|----------|----------|--|
| Nord | I20-I25 F | 0,9 | 17,4 | 2,3 | I20-I25 M | 3,6 | 13,9 | 0,6 |
| Nord-West | I20-I25 F | -5,3 | 16,6 | 1,5 | I20-I25 M | 2,3 | 18,0 | 1,7 |
| West | I20-I25 F | -1,1 | 18,5 | 3,2 | I20-I25 M | 2,6 | 18,6 | 2,4 |
| Mitte | I20-I25 F | 3,0 | 18,2 | 2,2 | I20-I25 M | 4,6 | 19,3 | 1,3 |
| Süd-West | I20-I25 F | -2,8 | 20,1 | 2,2 | I20-I25 M | 1,2 | 20,4 | 1,8 |
| Süd-Ost | I20-I25 F | -8,9 | 16,4 | 2,2 | I20-I25 M | 0,0 | 17,5 | 0,2 |
| Ost | I20-I25 F | - | 17,7 | 2,2 | I20-I25 M | 2,4 | 20,3 | 0,8 |
| Deutschland | I20-I22 | 2,3 | 17,7 | 2,0 | I24-I25 | 3,8 | 17,4 | 3,4 |
| Nord | I20-I22 | -0,5 | 20,1 | 1,3 | I24-I25 | 1,0 | 16,9 | 1,9 |
| Nord-West | I20-I22 | 1,8 | 21,6 | 0,3 | I24-I25 | 2,0 | 17,7 | 2,4 |
| West | I20-I22 | 2,0 | 18,1 | 2,3 | I24-I25 | 2,5 | 18,6 | 3,1 |
| Mitte | I20-I22 | 2,9 | 21,4 | 2,0 | I24-I25 | 3,9 | 18,5 | 1,8 |
| Süd-West | I20-I22 | 12,0 | 20,5 | 0,3 | I24-I25 | 0,2 | 20,1 | 3,4 |
| Süd-Ost | I20-I22 | -2,7 | 17,6 | 0,6 | I24-I25 | 0,0 | 16,5 | 1,7 |
| Ost | I20-I22 | 1,3 | 11,3 | 0,4 | I24-I25 | 2,0 | 19,3 | 2,4 |

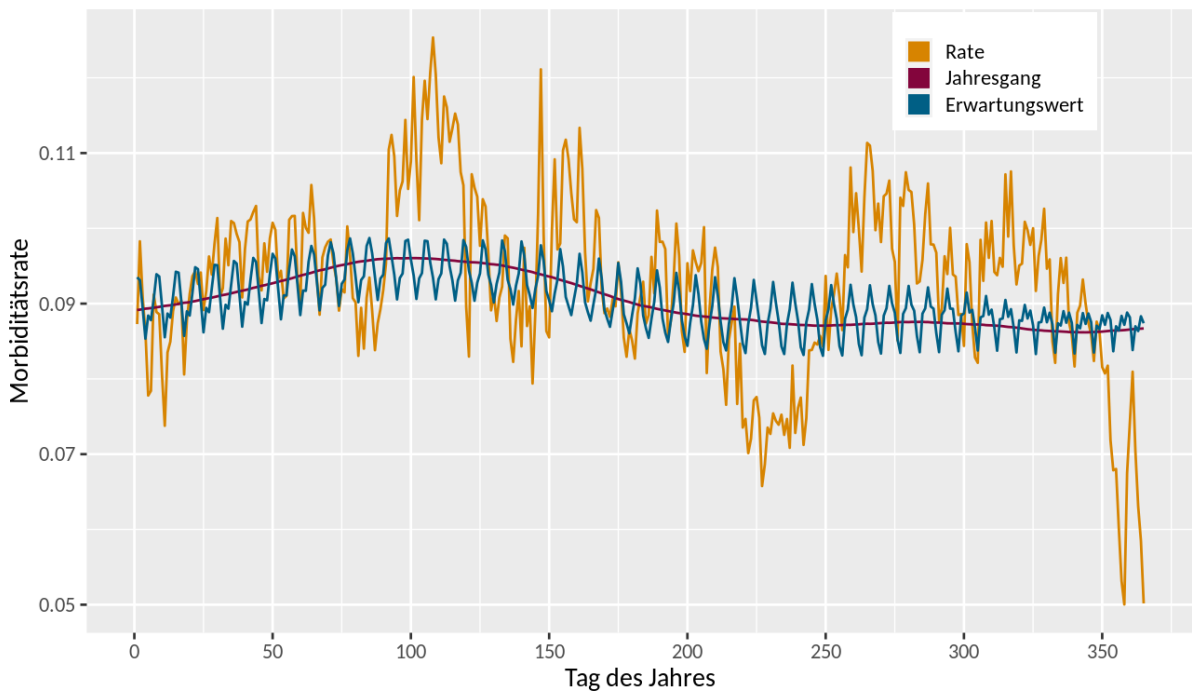
Erläuterungen F, Frauen; M, Männer; I20 – I25, ischämische Herzerkrankungen; I20 – I22, Angina Pectoris und akuter sowie rezidivierender Myokardinfarkt; I24 – I25, sonstige und chronische ischämische Herzkrankheit. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung A 2: Jahresverlauf der Morbiditätsrate aufgrund chronischen Erkrankungen der unteren Atemwege (J40 – J47) in Deutschland gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 und den dazu berechneten Erwartungswert und geglätteter Jahresgang.



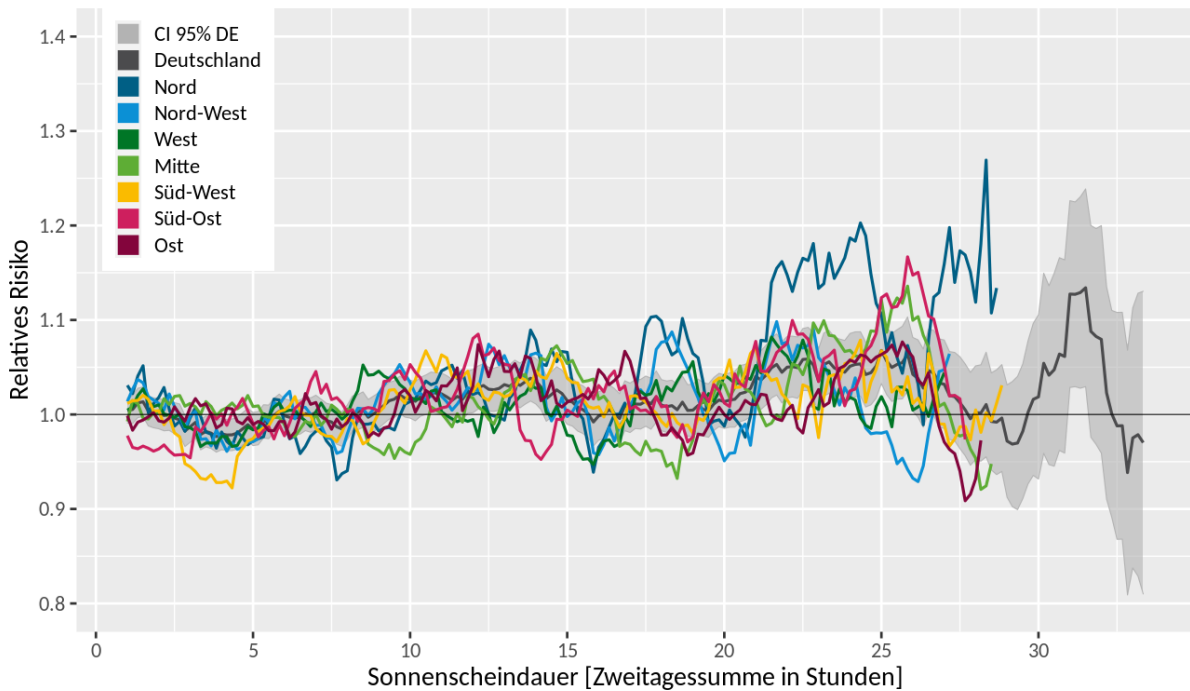
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung A 3: Jahresverlauf der Mortalitätsrate aufgrund Asthma bronchiale und Status asthmaticus (J45 – J46) in Deutschland gemittelt über die Jahre 2001 – 2015 und den dazu berechneten Erwartungswert und geglättetem Jahresgang.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung A 4: Zusammenhang zwischen der Sonnenscheindauer (Zweitagesummen) und dem Relativen Risiko von Suiziden der Jahre 2001 – 2015 aufgeteilt in sieben Großregionen und für den Deutschlandmittelwert mit Konfidenzintervall.



Erläuterungen: CI, Konfidenzintervall. Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle A 10: Prozentuale Abweichung der Mortalität aufgrund ischämischen Herzerkrankungen unterteilt in Subtypen und Geschlecht während Hitzewellen (gemittelt über alle Hitzewellentage) im Zeitraum 2001 – 2015 in Deutschland.

| Region | Änderung der Mortalität [%] I20 – I25 Gesamt | Änderung der Mortalität [%] I20 – I25 Frauen | Änderung der Mortalität [%] I20 – I25 Männer | Änderung der Mortalität [%] I20 – I22 | Änderung der Mortalität [%] I24 – I25 |
|-------------|--|--|--|--|--|
| Deutschland | 10,8 | 13,7 | 9,1 | 8,4 | 13,9 |
| Nord | 6,9 | 8,8 | 4,1 | 4,6 | 8,1 |
| Nord-West | 8,9 | 9,3 | 8,5 | 6,0 | 11,1 |
| West | 12,1 | 16,1 | 9,3 | 9,8 | 15,8 |
| Mitte | 10,8 | 12,6 | 10,1 | 8,8 | 12,5 |
| Süd-West | 10,1 | 12,7 | 8,7 | 7,2 | 13,7 |
| Süd-Ost | 7,0 | 10,5 | 4,6 | 6,4 | 9,1 |
| Ost | 11,7 | 14,1 | 10,0 | 7,9 | 15,2 |

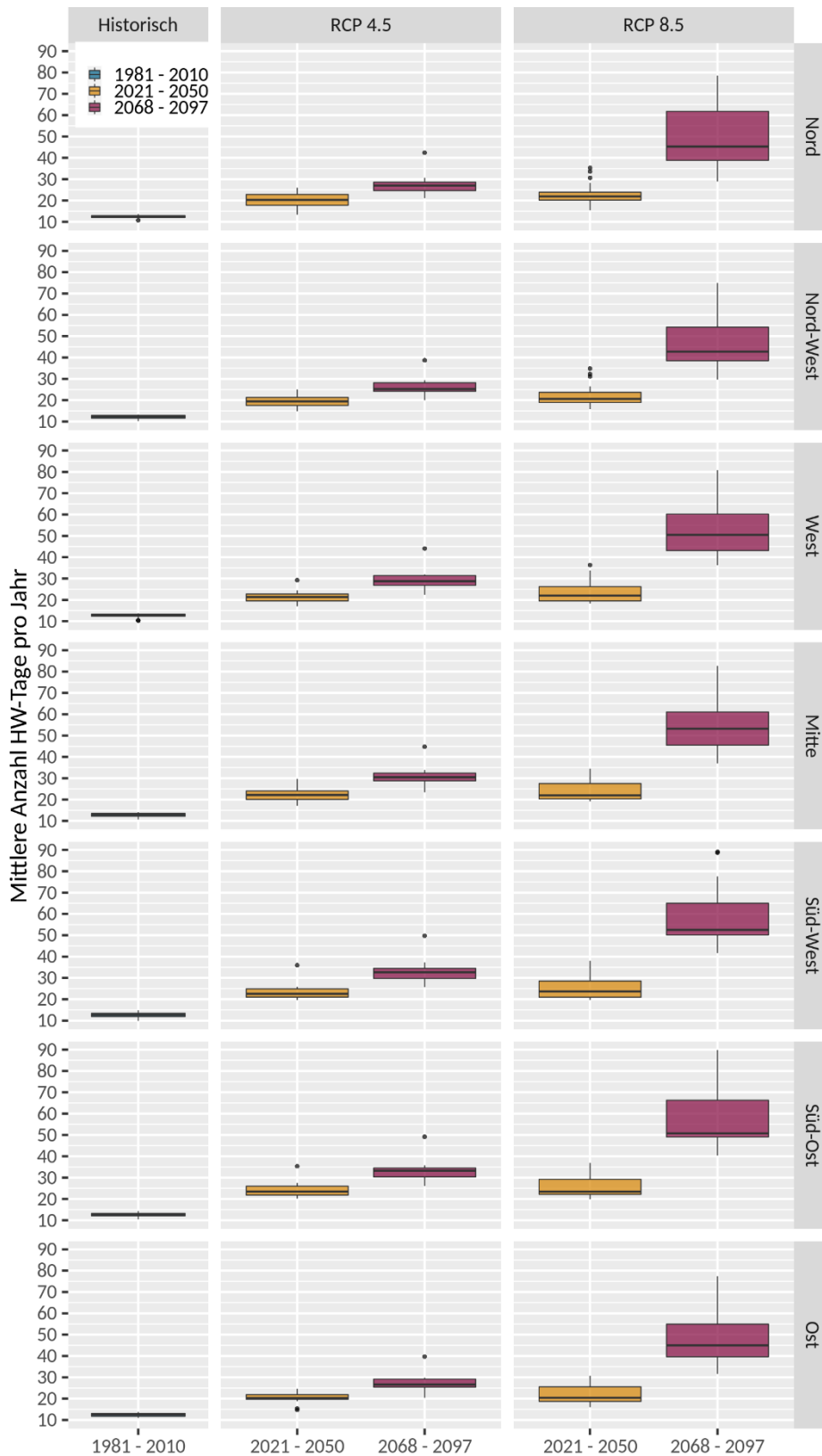
Erläuterungen: I20 – I25, ischämische Herzerkrankungen; I20 – I22, Angina Pectoris und akuter sowie rezidivierender Myokardinfarkt; I24 – I25, sonstige und chronische ischämische Herzkrankheit.

A.2.2 Anhänge zu Hitzeperioden

Tabelle A 11: Merkmale der Hitzewellen berechnet für den Referenzzeitraum 1981 – 2010 mit dem Beobachtungsdatensatz HYRAS für Deutschland und sieben deutsche Regionen.

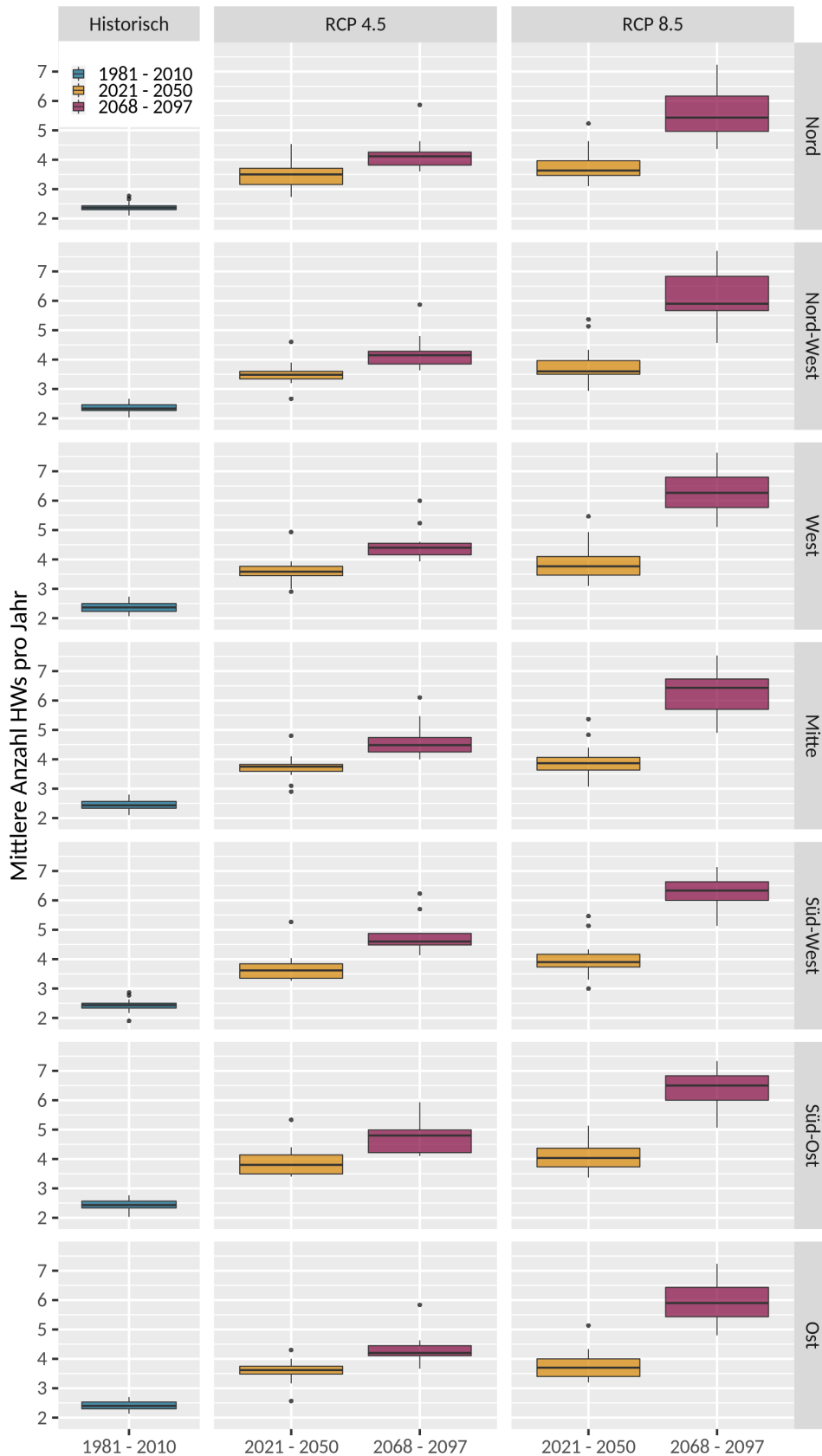
| Region | 95. Perzentil [°C] | Anzahl HW-Tage / Jahr [Tage] | Anzahl HW / Jahr | Dauer der HW [Tage] | Intensität [°C] | Saison Start [Tag des Jahres] | Saison Ende [Tag des Jahres] |
|-------------|--------------------|------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| Deutschland | 20,0 | 13,0 | 2,6 | 5,0 | 22,0 | 182 | 219 |
| Nord | 19,6 | 12,7 | 2,2 | 5,8 | 21,7 | 184 | 222 |
| Nord-West | 20,2 | 11,9 | 2,3 | 5,1 | 22,5 | 179 | 217 |
| West | 20,4 | 12,2 | 2,4 | 5,2 | 22,6 | 181 | 213 |
| Mitte | 20,1 | 12,5 | 2,6 | 4,8 | 22,2 | 179 | 215 |
| Süd-West | 20,3 | 11,7 | 2,4 | 4,9 | 22,2 | 182 | 210 |
| Süd-Ost | 20,0 | 12,3 | 2,4 | 5,1 | 21,9 | 179 | 213 |
| Ost | 20,9 | 12,8 | 2,6 | 5,0 | 23,0 | 179 | 216 |

Abbildung A 5: Mittlere Anzahl der Hitzewellen-Tage pro Jahr im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in sieben Regionen in Deutschland.



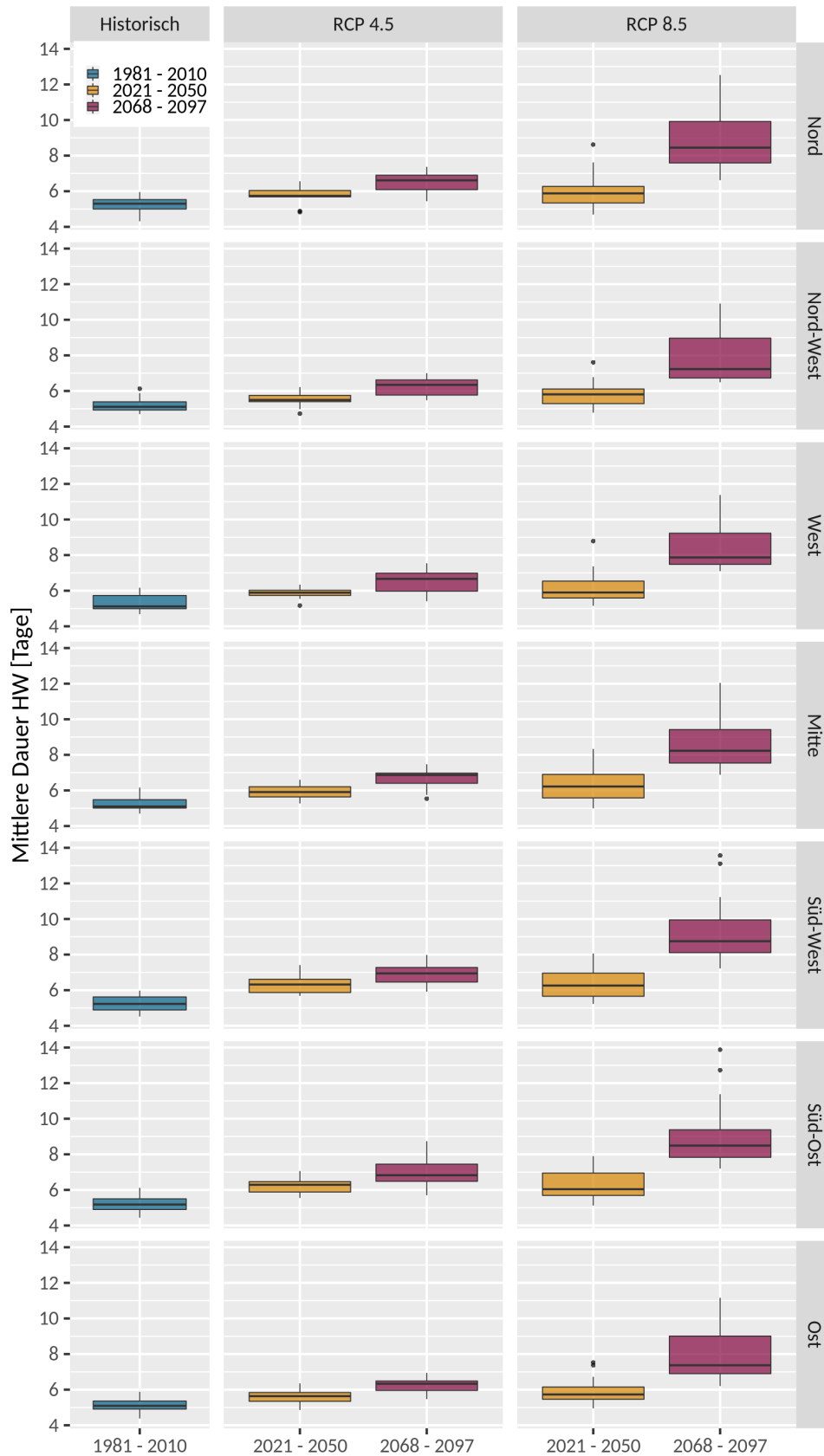
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung A 6: Mittlere Anzahl der Hitzewellen pro Jahr im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in sieben Regionen in Deutschland.



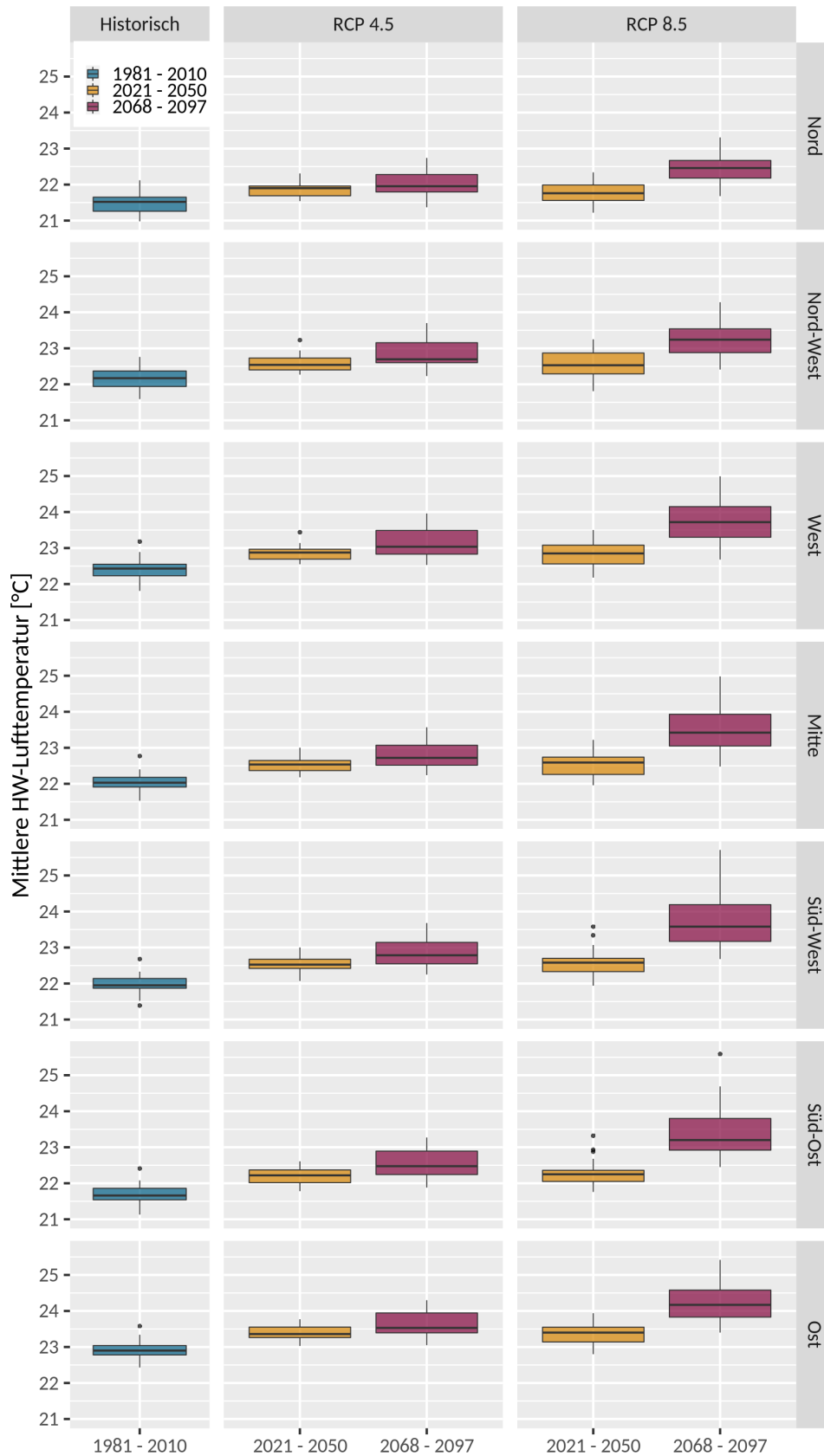
Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung A 7: Mittlere Dauer der Hitzewellen im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in sieben Regionen in Deutschland.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Abbildung A 8: Mittlere Intensität (Lufttemperatur in °C) der Hitzewellen im Referenzzeitraum 1981 – 2010 und die Veränderung der Anzahl in der Zukunft (2021 – 2050 und 2068 – 2097) anhand der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 in Deutschland.



Quelle: Eigene Darstellung, DWD.

Tabelle A 12: Hitzewellen-Charakteristiken mit 2-Tages-Mittelwerten der Lufttemperatur für sieben Regionen der historischen Ensemble-Daten sowie die prozentuale Änderung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts für zwei RCP-Szenarien.

| Region | HW-Charakteristik | HYRAS Häufigkeit/Jahr 1981 – 2010 | Historische Häufigkeit/Jahr 1981 – 2010 | RCP4.5 2021 – 2050 | RCP4.5 2068 – 2097 | RCP8.5 2021 – 2050 | RCP8.5 2068 – 2097 |
|-------------|-------------------|-----------------------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Deutschland | Anz. HW-Tage* | 13,7 | 13,3 | 21,9 | 29,9 | 24,7 | 50,1 |
| | HW-Anzahl | 2,0 | 2,1 | 3,2 | 3,8 | 3,3 | 4,9 |
| | HW-Dauer* | 6,7 | 6,5 | 7,3 | 8,2 | 7,9 | 11,0 |
| Nord | Anz. HW-Tage* | 12,9 | 13,3 | 21,9 | 29,9 | 24,7 | 50,1 |
| | HW-Anzahl | 1,8 | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 3,1 | 4,4 |
| | HW-Dauer* | 7,1 | 6,8 | 7,1 | 8,4 | 7,6 | 11,1 |
| Nord-West | Anz. HW-Tage* | 13,1 | 13,5 | 21,4 | 28,5 | 22,3 | 47,3 |
| | HW-Anzahl | 2,1 | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 3,2 | 4,8 |
| | HW-Dauer* | 6,2 | 6,5 | 7,0 | 7,7 | 7,3 | 10,1 |
| West | Anz. HW-Tage* | 13,5 | 13,4 | 22,7 | 21,6 | 23,1 | 52,7 |
| | HW-Anzahl | 2,0 | 2,1 | 3,2 | 3,8 | 3,2 | 5,1 |
| | HW-Dauer* | 6,7 | 6,3 | 7,2 | 8,2 | 7,3 | 10,6 |
| Mitte | Anz. HW-Tage* | 12,6 | 13,5 | 23,8 | 32,5 | 24,1 | 56,2 |
| | HW-Anzahl | 2,1 | 2,1 | 3,2 | 3,9 | 3,3 | 5,0 |
| | HW-Dauer* | 6,1 | 6,4 | 7,4 | 8,3 | 7,7 | 10,6 |
| Süd-West | Anz. HW-Tage* | 13,1 | 13,7 | 24,7 | 35,3 | 25,3 | 57,5 |
| | HW-Anzahl | 2,1 | 2,1 | 3,2 | 4,0 | 3,4 | 5,2 |
| | HW-Dauer* | 6,3 | 6,5 | 7,8 | 8,6 | 7,8 | 11,5 |
| Süd-Ost | Anz. HW-Tage* | 13,4 | 13,9 | 25,2 | 35,5 | 25,5 | 55,1 |
| | HW-Anzahl | 2,0 | 2,1 | 3,4 | 4,1 | 3,5 | 5,3 |
| | HW-Dauer* | 6,6 | 6,3 | 7,8 | 8,7 | 7,5 | 11,0 |
| Ost | Anz. HW-Tage* | 13,4 | 13,5 | 21,2 | 29,0 | 22,1 | 47,4 |
| | HW-Anzahl | 2,2 | 2,1 | 3,1 | 3,7 | 3,2 | 4,8 |
| | HW-Dauer* | 6,1 | 6,3 | 7,0 | 8,2 | 7,3 | 10,1 |

Erläuterung: * HW-Doppeltage umgerechnet auf Einzeltage (2 Doppeltage ≈ 4 Einzeltage).

Tabelle A 13: Mittlere Anzahl der Hitzewellen (HW) und entsprechender Hitzewellentage pro Jahr (Definition mit Zweitages-Mittelwerten) für jeweils 30 Jahre des Referenzzeitraums (historisch), der nahen und fernen Zukunft für Deutschland und seine sieben Regionen. Die Hitzewellen sind in drei Kategorien anhand ihrer Dauer eingeteilt.

| Region | Hitzewellen Anzahl / Jahr | 1981 – 2010 HWs | HW-Tage | RCP4.5 2021 – 2050 HWs | HW-Tage | RCP4.5 2068 – 2097 HWs | HW-Tage | RCP8.5 2021 – 2050 HWs | HW-Tage | RCP8.5 2068 – 2097 HWs | HW-Tage |
|-------------|---------------------------|-----------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|
| Deutschland | 2 D-Tage | 1,0 | 3,9 | 1,3 | 5,2 | 1,6 | 6,4 | 1,3 | 5,2 | 1,6 | 6,3 |
| | 3-4 D-Tage | 0,7 | 4,7 | 1,1 | 7,4 | 1,2 | 8,1 | 1,1 | 7,5 | 1,4 | 9,4 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,3 | 4,7 | 0,8 | 10,8 | 1,1 | 16,9 | 0,9 | 11,9 | 1,8 | 30,1 |
| Nord | 2 D-Tage | 1,0 | 3,9 | 1,4 | 5,5 | 1,4 | 5,7 | 1,3 | 5,2 | 1,4 | 5,7 |
| | 3-4 D-Tage | 0,7 | 4,5 | 1,0 | 6,5 | 1,2 | 7,7 | 1,1 | 7,6 | 1,2 | 8,5 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,3 | 4,8 | 0,7 | 9,8 | 1,0 | 14,6 | 0,7 | 11,2 | 1,6 | 27,3 |
| Nord-West | 2 D-Tage | 1,0 | 4,0 | 1,4 | 5,5 | 1,5 | 6,0 | 1,4 | 5,5 | 1,6 | 6,5 |
| | 3-4 D-Tage | 0,7 | 4,5 | 1,1 | 7,4 | 1,2 | 7,8 | 1,1 | 7,6 | 1,4 | 9,7 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,3 | 4,7 | 0,6 | 8,4 | 0,9 | 13,3 | 0,6 | 10,1 | 1,5 | 25,9 |
| West | 2 D-Tage | 1,0 | 4,0 | 1,3 | 5,2 | 1,6 | 6,3 | 1,3 | 5,3 | 1,6 | 6,3 |
| | 3-4 D-Tage | 0,7 | 4,5 | 1,1 | 7,4 | 1,3 | 8,8 | 1,1 | 7,3 | 1,5 | 10,4 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,3 | 4,3 | 0,8 | 9,9 | 1,1 | 15,4 | 0,8 | 10,5 | 1,7 | 28,5 |
| Mitte | 2 D-Tage | 1,0 | 4,0 | 1,3 | 5,3 | 1,5 | 5,9 | 1,3 | 5,1 | 1,6 | 6,5 |
| | 3-4 D-Tage | 0,8 | 5,1 | 1,2 | 7,9 | 1,3 | 8,9 | 1,1 | 7,5 | 1,5 | 9,9 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,3 | 4,3 | 0,8 | 11,1 | 1,1 | 16,9 | 0,8 | 11,3 | 1,8 | 29,5 |
| Süd-West | 2 D-Tage | 1,0 | 4,0 | 1,2 | 4,8 | 1,6 | 6,3 | 1,3 | 5,2 | 1,6 | 6,4 |
| | 3-4 D-Tage | 0,7 | 5,1 | 1,1 | 7,4 | 1,4 | 9,5 | 1,2 | 8,1 | 1,4 | 9,7 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,3 | 4,3 | 0,9 | 12,0 | 1,2 | 19,8 | 0,9 | 12,7 | 1,9 | 32,6 |
| Süd-Ost | 2 D-Tage | 1,0 | 4,0 | 1,4 | 5,5 | 1,5 | 6,1 | 1,4 | 5,7 | 1,6 | 6,3 |
| | 3-4 D-Tage | 0,7 | 4,9 | 1,1 | 7,8 | 1,4 | 9,6 | 1,2 | 8,0 | 1,4 | 9,7 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,4 | 4,6 | 0,9 | 12,4 | 1,2 | 19,1 | 0,9 | 12,5 | 2,0 | 33,3 |
| Ost | 2 D-Tage | 1,0 | 4,1 | 1,4 | 5,5 | 1,4 | 5,6 | 1,4 | 5,5 | 1,7 | 6,8 |
| | 3-4 D-Tage | 0,7 | 4,3 | 1,1 | 7,7 | 1,2 | 8,2 | 1,0 | 7,0 | 1,5 | 10,3 |
| | ≥ 5 D-Tage | 0,3 | 4,7 | 0,6 | 8,7 | 1,0 | 13,6 | 0,7 | 9,9 | 1,6 | 27,2 |

Erläuterungen: D-Tage, Doppeltage; HW, Hitzewelle.

Tabelle A 14: Mittlere Anzahl der Hitzewellen (HW) und entsprechender Hitzewellentage pro Jahr (Definition mit Ein-Tages-Werten) für jeweils 30 Jahre des historischen Referenzzeitraums, der nahen und fernen Zukunft für Deutschland und seine sieben Regionen. Die Hitzewellen sind in drei Kategorien anhand ihrer Dauer eingeteilt.

| Region | Hitzewellen-Anzahl / Jahr | 1981 – 2010 HWs | HW-Tage | RCP4.5 2021 – 2050 HWs | HW-Tage | RCP4.5 2068 – 2097 HWs | HW-Tage | RCP8.5 2021 – 2050 HWs | HW-Tage | RCP8.5 2068 – 2097 HWs | HW-Tage |
|-------------|---------------------------|-----------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|
| Deutschland | 3-4 Tage | 1,3 | 4,6 | 1,8 | 6,2 | 1,9 | 6,5 | 1,8 | 6,1 | 2,3 | 7,6 |
| | 5-9 Tage | 0,8 | 5,4 | 1,4 | 9,2 | 1,6 | 10,4 | 1,4 | 9,2 | 2,0 | 13,6 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,7 | 0,5 | 6,9 | 0,8 | 11,7 | 0,6 | 7,7 | 1,6 | 27,5 |
| Nord | 3-4 Tage | 1,3 | 4,4 | 1,8 | 5,9 | 1,8 | 6,2 | 2,0 | 6,6 | 2,3 | 7,8 |
| | 5-9 Tage | 0,8 | 5,3 | 1,2 | 7,7 | 1,5 | 1,3 | 1,3 | 8,2 | 2,0 | 11,4 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,6 | 0,4 | 6,0 | 0,6 | 9,1 | 0,4 | 7,4 | 1,3 | 26,1 |
| Nord-West | 3-4 Tage | 1,3 | 4,5 | 1,8 | 6,6 | 2,1 | 6,4 | 1,8 | 6,6 | 2,4 | 8,5 |
| | 5-9 Tage | 0,8 | 5,2 | 1,4 | 7,5 | 1,6 | 9,7 | 1,4 | 8,3 | 2,0 | 13,6 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,1 | 0,4 | 4,7 | 0,7 | 8,6 | 0,5 | 6,1 | 1,4 | 21,3 |
| West | 3-4 Tage | 1,2 | 4,2 | 1,8 | 6,0 | 2,1 | 7,2 | 1,8 | 6,3 | 2,4 | 8,3 |
| | 5-9 Tage | 0,8 | 5,3 | 1,4 | 8,6 | 1,6 | 10,6 | 1,4 | 9,0 | 2,1 | 13,6 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,6 | 0,5 | 5,7 | 0,7 | 9,8 | 0,5 | 6,3 | 1,5 | 24,3 |
| Mitte | 3-4 Tage | 1,4 | 4,6 | 1,9 | 6,4 | 2,0 | 6,7 | 1,9 | 6,4 | 2,3 | 7,9 |
| | 5-9 Tage | 0,8 | 5,2 | 1,4 | 9,2 | 1,6 | 10,6 | 1,4 | 8,8 | 2,2 | 14,3 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,7 | 0,5 | 6,3 | 0,7 | 10,6 | 0,6 | 7,8 | 1,5 | 26,6 |
| Süd-West | 3-4 Tage | 1,3 | 4,4 | 1,6 | 5,7 | 2,2 | 7,6 | 1,9 | 6,4 | 2,1 | 7,1 |
| | 5-9 Tage | 0,9 | 5,7 | 1,5 | 9,4 | 1,6 | 10,2 | 1,4 | 9,5 | 2,2 | 14,7 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,6 | 0,6 | 7,7 | 0,9 | 13,0 | 0,6 | 8,3 | 1,7 | 29,2 |
| Süd-Ost | 3-4 Tage | 1,3 | 4,5 | 1,9 | 6,4 | 2,1 | 7,0 | 1,9 | 6,5 | 2,3 | 8,0 |
| | 5-9 Tage | 0,8 | 5,4 | 1,5 | 9,6 | 1,8 | 11,7 | 1,5 | 9,5 | 2,2 | 14,2 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,4 | 0,6 | 7,8 | 0,9 | 12,1 | 0,6 | 8,5 | 1,7 | 28,4 |
| Ost | 3-4 Tage | 1,4 | 4,8 | 2,0 | 6,8 | 2,0 | 6,9 | 1,9 | 6,4 | 2,6 | 8,6 |
| | 5-9 Tage | 0,8 | 5,1 | 1,2 | 7,8 | 1,5 | 10,0 | 1,3 | 8,2 | 2,0 | 13,3 |
| | ≥ 10 Tage | 0,2 | 2,3 | 0,4 | 5,6 | 0,6 | 8,5 | 0,4 | 6,0 | 1,4 | 22,3 |