

CLIMATE CHANGE

24/2021

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 5: Risiken und Anpassung in den Clustern
Wirtschaft und Gesundheit

CLIMATE CHANGE 24/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 102 0

UBA-FB XXX

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 5: Risiken und Anpassung in den Clustern
Wirtschaft und Gesundheit

von

Mareike Wolf, Can Ölmez, Konstanze Schönthaler
Bosch & Partner, München

Luise Porst, Maike Voß, Manuel Linsenmeier,
Walter Kahlenborn, Lukas Dorsch, Leonie Dudda
adelphi, Berlin

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:

adelphi research gemeinnützige GmbH
Alt-Moabit 91
10559 Berlin

Eurac Research
Viale Druso/Drususallee 1
39100 Bolzano/Bozen
Italien

Bosch & Partner GmbH
Pettenkoferstraße 24
80336 München

Abschlussdatum:

Juni 2021 [Sprachliche Korrekturen im Oktober 2021]

Redaktion:

Fachgebiet I 1.6 KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Dr. Inke Schauser

Publikationen als pdf:

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

ISSN 000 000

Dessau-Roßlau, Juni 2021

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

Kurzbeschreibung: Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 5: Risiken und Anpassung in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit

Der vorliegende Bericht ist einer der sechs Teilberichte zur „Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“, die darauf abzielt, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen. Dafür wurden strukturiert nach Klimawirkungen und Handlungsfeldern sowohl künftige Klimarisiken als auch Möglichkeiten der Anpassung untersucht. Der vorliegende Teilbericht behandelt die Cluster Wirtschaft und Gesundheit, welchen die Handlungsfelder „Industrie und Gewerbe“ sowie „Tourismuswirtschaft“ beziehungsweise „Menschliche Gesundheit“ zugeordnet sind.

Für jedes Handlungsfeld werden ausgewählte Klimawirkungen analysiert, wobei jeweils auf den aktuellen Kenntnisstand und die Entwicklung bis zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts eingegangen wird. Zudem werden für jede Klimawirkung die Ergebnisse der Klimarisikobewertung dargestellt. Daran anschließend werden für bestimmte Klimawirkungen Anpassungsoptionen diskutiert und mögliche Herausforderungen bezüglich der Anpassung aufgezeigt. Diese Abschnitte werden durch die Einschätzung der Anpassungskapazität sowie kurze Erläuterungen zu den Handlungserfordernissen ergänzt. Je Handlungsfeld sind alle Ergebnisse abschließend zu tabellarischen Übersichten zusammengefasst.

Abstract: Climate impact and risk analysis 2021 for Germany. Sub-report 5: Risks and adaptation in the thematic clusters Economy and Health

This report is one of the six sub-reports of the "Climate Impact and Risk Analysis 2021 for Germany", which aims to provide an essential basis for the further development of adaptation in Germany. For this purpose, future climate risks as well as possibilities for adaptation were investigated in a structured manner according to climate impacts and fields of action. The present partial report deals with the thematic clusters Economy and Health which are composed of the fields of action "Industry and trade" as well as "Tourism economy" and "Human health", respectively.

For each field of action, selected climate impacts are analyzed, whereby the current state of knowledge and the development up to the middle and end of the 21st century are discussed. In addition, the results of the climate risk assessment are presented for each climate impact. Subsequently, adaptation options for certain climate impacts are discussed and potential challenges regarding adaptation are identified. These sections are supplemented by an assessment of adaptation capacity and brief explanations of the need for action. Finally, all results are summarized in tabular overviews for each field of action.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis.....	14
Zusammenfassung.....	22
1 Einleitung.....	30
1.1 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021)	30
1.2 Die Grenzen der KWRA 2021	31
1.3 Methodisches Vorgehen	31
1.4 Beteiligte an der KWRA 2021	33
1.5 Struktur des Berichtes der KWRA 2021	33
2 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe	35
2.1 Ausgangslage.....	35
2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes.....	35
2.1.2 Neuere Entwicklungen.....	36
2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	36
2.2 Klimawirkungen im Detail	38
2.2.1 Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international).....	38
2.2.2 Bedingungen auf Absatzmärkten (international)	50
2.2.3 Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien	56
2.2.4 Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs.....	58
2.2.5 Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	60
2.2.6 Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs (Inland).....	69
2.2.7 Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung	71
2.2.8 Wasserbedarf.....	74
2.2.9 Freisetzung gefährlicher Stoffe.....	76
2.2.10 Leistungseinbußen von Beschäftigten	78
2.2.11 Beeinträchtigung von Produktionsprozessen	81
2.2.12 Aufwand für die betriebliche Planung	84
2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	86
2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	86
2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	87
2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder	88

2.4	Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	89
2.5	Quellenverzeichnis.....	91
3	Handlungsfeld Tourismuswirtschaft.....	104
3.1	Ausgangslage.....	104
3.1.1	Relevanz des Handlungsfeldes.....	104
3.1.2	Neuere Entwicklungen.....	106
3.1.3	Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	107
3.2	Klimawirkungen im Detail	108
3.2.1	Einschränkungen touristischer Angebote.....	108
3.2.1.1	Auswirkungen fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus	108
3.2.1.2	Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus.....	121
3.2.2	Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen	125
3.2.3	Verlagerung der Nachfrage.....	127
3.2.4	Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft.....	131
3.3	Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	134
3.3.1	Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	134
3.3.2	Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	138
3.3.3	Beiträge der Querschnittsfelder	140
3.4	Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	141
3.5	Quellenverzeichnis.....	143
4	Handlungsfeld Menschliche Gesundheit.....	149
4.1	Ausgangslage.....	149
4.1.1	Relevanz des Handlungsfeldes.....	149
4.1.2	Neuere Entwicklungen.....	150
4.1.3	Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	150
4.2	Klimawirkungen im Detail	153
4.2.1	Hitzebelastung	153
4.2.2	Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft	173
4.2.3	Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen.....	185
4.2.4	UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs).....	195
4.2.5	Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren	205
4.2.6	Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen).....	208
4.2.7	Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen	211
4.2.8	Auswirkungen auf das Gesundheitssystem	213

4.3	Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	215
4.3.1	Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	215
4.3.2	Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	218
4.3.3	Beiträge der Querschnittsfelder	218
4.4	Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	220
4.5	Quellenverzeichnis.....	222

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Importvolumen und gewichtete Vulnerabilität für ausgewählte Rohstoffe (Darstellung in HS-Codes).....	41
Abbildung 2:	Importvolumen und gewichtete Vulnerabilität für ausgewählte Zwischenprodukte (Darstellung in HS-Codes)	43
Abbildung 3:	Gesamtentwicklung des deutschen Außenhandels (2000-2018).....	50
Abbildung 4:	Vulnerabilität und Exportvolumen ausgewählter deutscher Wirtschaftszweige (Darstellung in ISIC-Kategorien)	52
Abbildung 5:	Potenzielle mittlere Beladungsgrade für häufige Schiffstypen für die Pegel Ruhrort, Kaub und Maxau während des hydrologischen Sommerhalbjahres für den Zeitraum 1985 bis 2085	62
Abbildung 6:	Potenzielle mittlere Beladungsgrade für häufige Schiffstypen für den Pegel Maxau während des hydrologischen Sommerhalbjahres für den Zeitraum 1985 bis 2085	62
Abbildung 7:	Potenzielle mittlere Beladungsgrade für häufige Schiffstypen für den Pegel Kaub während des hydrologischen Sommerhalbjahres für den Zeitraum 1985 bis 2085	63
Abbildung 8:	Mittlere Anzahl potenzieller Schneetage im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar	116
Abbildung 9:	Mittlere Anzahl an Niederschlagstagen in der Periode 10. Dezember bis 31. Januar, die <i>keine</i> potenziellen Schneetage sind	117
Abbildung 10:	Datum des ersten Tages im Winter, der als Eistag auf zwei vorhergehende Eistage folgt (Maximaltemperatur $t_{\text{max}} < 0^{\circ}\text{C}$)	117
Abbildung 11:	Winteratmosphäre – Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr mit einer Schneehöhe \geq drei Zentimeter	118
Abbildung 12:	Schneewahrscheinlichkeit – vieljährige mittlere Prozentanteile an Tagen mit Schneehöhen \geq drei Zentimeter im Zeitraum zwischen 10. Dezember und 31. Januar	118
Abbildung 13:	Einflussfaktoren auf Reisebereitschaft und -möglichkeiten sowie Attraktivität, Ausstattung und Erreichbarkeit des Ziels (am Beispiel des Küstentourismus)	128
Abbildung 14:	Mittlere Anzahl der Hitzeperioden pro Jahr	158
Abbildung 15:	Mittlere Dauer der Hitzeperioden in Tagen je Hitzeperiode.....	159
Abbildung 16:	Bevölkerungsdichte in Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar	160
Abbildung 17:	Anzahl der Einwohnerinnen und Einwohner auf Kreisebene.....	161
Abbildung 18:	Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahre an der Gesamtbevölkerung in Prozent	162
Abbildung 19:	Anteil der Einpersonenhaushalte an allen Haushalten in Prozent.....	162
Abbildung 20:	Tag des Blühbeginns der Erle im Jahr	177
Abbildung 21:	Lage der Punkte, zu denen für die Operationalisierung der Klimawirkung „Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“ Daten ausgewertet wurden	190
Abbildung 22:	Spannbreiten der Projektionen zur <i>Vibrio</i> -Aktivität in einzelnen Jahren.....	192

Abbildung 23:	Zeitpunkt des Einsetzens relevanter Vibrionen-Aktivität an den Punkten Fehmarnbelt, Darßer Schwelle und Arkonabecken in den Zeiträumen 1971-2000, 2031-2060 und 2071-2099	194
---------------	---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“	37
Tabelle 2:	Beispiele für Rohstoffe, Zwischenprodukte und Endprodukte	38
Tabelle 3:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	40
Tabelle 4:	Auswahl der hochvulnerablen Produktgruppen und spezifizierte Produkte mit Importländern absteigend nach Vulnerabilitätswert	41
Tabelle 5:	Auswahl der hochvulnerablen Produktgruppen mit Importländern absteigend nach Vulnerabilitätswert	44
Tabelle 6:	„Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“: Klimarisiko ohne Anpassung	46
Tabelle 7:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“	47
Tabelle 8:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“	49
Tabelle 9:	Zeitdauer der Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“	49
Tabelle 10:	„Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“: Wirksamkeit der Anpassung	50
Tabelle 11:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	51
Tabelle 12:	Detaillierte Ergebnisse vulnerabler Wirtschaftszweige mit einem Exportvolumen von mindestens einer Milliarden US-Dollar, absteigend nach Vulnerabilitätswert (Ausschnitt der 20 vulnerabelsten Wirtschaftszweige)	53
Tabelle 13:	„Bedingungen auf Absatzmärkten (international)“: Klimarisiko ohne Anpassung	55
Tabelle 14:	„Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien“: Klimarisiko ohne Anpassung	57
Tabelle 15:	„Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs“: Klimarisiko ohne Anpassung	59
Tabelle 16:	„Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“: Klimarisiko ohne Anpassung	63
Tabelle 17:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ laut APA III	64
Tabelle 18:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“	67

Tabelle 19:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“68
Tabelle 20:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“68
Tabelle 21:	„Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“: Wirksamkeit der Anpassung.....69
Tabelle 22:	„Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung69
Tabelle 23:	„Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs (Inland)“: Klimarisiko ohne Anpassung.....71
Tabelle 24:	„Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung“: Klimarisiko ohne Anpassung.....73
Tabelle 25:	„Wasserbedarf“: Klimarisiko ohne Anpassung.....75
Tabelle 26:	„Freisetzung gefährlicher Stoffe“: Klimarisiko ohne Anpassung.....78
Tabelle 27:	„Leistungseinbußen von Beschäftigten“: Klimarisiko ohne Anpassung.....81
Tabelle 28:	„Beeinträchtigung von Produktionsprozessen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....83
Tabelle 29:	„Aufwand für die betriebliche Planung“: Klimarisiko ohne Anpassung85
Tabelle 30:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“89
Tabelle 31:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“90
Tabelle 32:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“90
Tabelle 33:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ ...107
Tabelle 34:	Zielsystem der spezifizierten Klimawirkung „Auswirkungen fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus“110
Tabelle 35:	Übersicht der Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung111
Tabelle 36:	Zusammenführung der Indikatoren für den Faktor Schneesicherheit.....119
Tabelle 37:	„Auswirkungen von fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus“: Klimarisiko ohne Anpassung.....121
Tabelle 38:	„Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus“: Klimarisiko ohne Anpassung125
Tabelle 39:	„Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....127
Tabelle 40:	„Verlagerung der Nachfrage“: Klimarisiko ohne Anpassung.....130
Tabelle 41:	„Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft“: Klimarisiko ohne Anpassung.....133
Tabelle 42:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“141
Tabelle 43:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“.....142
Tabelle 44:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Tourismus“142
Tabelle 45:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“151
Tabelle 46:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Hitzebelastung“157

Tabelle 47:	„Hitzebelastung“: Klimarisiko ohne Anpassung	166
Tabelle 48:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Hitzebelastung“ laut APA III	167
Tabelle 49:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Hitzebelastung“	169
Tabelle 50:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung "Hitzebelastung"	171
Tabelle 51:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung "Hitzebelastung"	171
Tabelle 52:	„Hitzebelastung“: Wirksamkeit der Anpassung	172
Tabelle 53:	„Hitzebelastung“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	172
Tabelle 54:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“	176
Tabelle 55:	„Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	179
Tabelle 56:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ laut APA III	181
Tabelle 57:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“	182
Tabelle 58:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“	184
Tabelle 59:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“	184
Tabelle 60:	„Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“: Wirksamkeit der Anpassung.....	185
Tabelle 61:	„Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	185
Tabelle 62:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“	193
Tabelle 63:	„Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	195
Tabelle 64:	„UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs“): Klimarisiko ohne Anpassung.....	199
Tabelle 65:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung in Bezug auf die Klimawirkung „UV- bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“ laut APA III	200
Tabelle 66:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“	202

Tabelle 67:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“203
Tabelle 68:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“204
Tabelle 69:	„UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“: Wirksamkeit der Anpassung204
Tabelle 70:	„UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung204
Tabelle 71:	„Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren“: Klimarisiko ohne Anpassung207
Tabelle 72:	„Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)“: Klimarisiko ohne Anpassung211
Tabelle 73:	„Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen“: Klimarisiko ohne Anpassung213
Tabelle 74:	„Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“: Klimarisiko ohne Anpassung215
Tabelle 75:	Anpassungsmaßnahmen bezogen auf die Klimawirkungen „Ausbreitung und Abundanzveränderung möglicher Vektoren“ und „Ausbreitung potenziell schädlicher Mikroorganismen und Algen“216
Tabelle 76:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“220
Tabelle 77:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“221
Tabelle 78:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“221

Abkürzungsverzeichnis

APA III	Aktionsplan Anpassung III
ASMK	Arbeits- und Sozialministerkonferenz
BEC	Broad Economic Categories
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BIP	Bruttoinlandprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMG	Bundesministerium für Gesundheit
BMVI	Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CLIC	Projekt „Klima-Wirkungsketten in einer globalisierten Welt“
CLP	Classification, Labelling and Packaging
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DMO	Destinationsmanagementorganisation
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECDC	European Centre for Disease Prevention and Control
EU	Europäische Union
FFH	Flora Fauna Habitat
FSME	Frühsommer-Meningoenzephalitis
GMK	Gesundheitsministerkonferenz
HWRM-RL	EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie
IMA-A	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISIC	International Standard Industrial Classification
KLIWAS	Ressortforschungsprogramm „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen“
KLUG	Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KRI	Klima-Risiko-Index
KWRA 2021	Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland
LARSIM-ME	Wasserhaushaltsmodell “Large Area Runoff Simulation Model” für Mitteleuropa
ND-GAIN Index	Notre Dame Global Adaptation Initiative Index
NHWSP	Nationales Hochwasserschutzprogramm
OAS	orales Allergiesyndrom
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PET	Physiologisch Äquivalente Temperatur

PROWaS	Pilotprojekt Klima- und Wasser-Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt
PSU	Practical Salinity Units
RCP	Representative Concentration Pathway
RKI	Robert Koch-Institut
SRES	Special Report on Emission Szenarios
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
TCFD	Taskforce on Climate-Related Financial Disclosures
UBA	Umweltbundesamt
UHI_{max}	Maximale Wärmeinselintensität
UV-Strahlung	Ultraviolettstrahlung
VA 2015	Vulnerabilitätsanalyse 2015
VBNC	lebend, aber nicht kultivierbar (viable but non-culturable)

Glossar

Begriff	Erläuterung
Anpassungsdauer	Als Anpassungsdauer wird die Zeitdauer für das Wirksamwerden umfassender Maßnahmen zur großräumigen Reduzierung einer Klimawirkung in Deutschland bezeichnet. Die benötigte Zeit umfasst die Zeit für Vorarbeiten, wie die Sicherung der Akzeptanz und Finanzierung, Planung, Bau und sonstige Umsetzungsprozesse, wie die Entwicklung von neuen Märkten, sowie die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahme vor Ort.
Anpassungsdimension	Grundlegende Kategorien, denen einzelne Anpassungsmaßnahmen oder Anpassungsinstrumente zugeordnet werden können. In der KWRA 2021 werden sechs Anpassungsdimensionen genutzt: Wissen; Motivation und Akzeptanz; Technologie und natürliche Ressourcen; Finanzielle Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien sowie Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen.
Anpassungskapazität	Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und anderen Lebewesen, sich auf potenzielle Schäden einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren (ISO 14091; Agard et al. 2014). Wichtige Dimensionen der Anpassung sind zum Beispiel Wissen oder Technologie.
Behördennetzwerk	Netzwerk aus Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen zum Thema „Klimawandel und Anpassung“.
Beitrag der Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit der Anpassung	Ausmaß, in dem beschlossene Maßnahmen beziehungsweise weiterreichende Anpassung durch einen Zuwachs an Wissen, eine Steigerung der Motivation und Akzeptanz, einen Zuwachs an Technologie und natürlichen Ressourcen, einen Zuwachs an finanziellen Ressourcen, eine Erweiterung der rechtlichen Rahmenbedingungen und politischen Strategien oder eine Erweiterung der institutionellen Struktur und personellen Ressourcen in Zukunft wirksam werden beziehungsweise werden können.
Beschlossene Maßnahmen	Teil des Möglichkeitsraums einer weiterreichenden Anpassungskapazität; Grundlage für die Identifizierung beschlossener Maßnahmen sind die im Aktionsplan Anpassung III (APA III) der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) formulierten Anpassungsinstrumente und -maßnahmen in der Zuständigkeit des Bundes (in Ausnahmefällen auch weitere Planungsdokumente, sofern diese politisch bereits beschlossene Planungen mit klarem Maßnahmencharakter enthalten).
Bewertung des Klimarisikos	Bewertung des Klimarisikos der in der KWRA 2021 bearbeiteten Klimawirkungen und Handlungsfelder. Die Bewertung des Klimarisikos zeigt auf, welche gesellschaftlichen und ökologischen Folgen sich aus einer geminderten Funktionsfähigkeit eines betrachteten Systems ergeben könnten. Für die Bewertung der Klimarisiken wurde eine dreistufige Skala von „gering“, „mittel“, „hoch“ verwendet. Die Bewertung erfolgte in Form qualitativer Expertenurteile, es wurden keine Schwellenwerte festgelegt.
Bezugszeitraum	Der Zeitraum von 1971-2000.
Delphi-Methode	Eine Methode zum Ermitteln von Gruppenurteilen. Im Rahmen der Delphi-Methode wird durch Diskussionsprozesse die Findung eines Konsenses von Expertenmeinungen angestrebt. Dabei werden individuelle Antworten oder Bewertungsergebnisse aggregiert und in die Gruppe zurückgegeben. Die Gruppenmitglieder haben dann die Möglichkeit ihre Antworten zu

Begriff	Erläuterung
	überprüfen und, wenn gewollt, zu überarbeiten. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis ein vorher definiertes Ergebnis erreicht ist (zum Beispiel Konsens, Anzahl an Iterationen) (Grime und Wright 2014; Zartha Sossa et al. 2019)
Dynamik-Szenario der sozioökonomischen Projektionen	Für die KWRA 2021 entwickeltes sozioökonomisches Szenario, das einer Entwicklung mit einer vergleichsweise stärkeren Bevölkerungsentwicklung und einem höheren Wirtschaftswachstum entspricht.
Ende des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2071 bis 2100.
Expertenwissen	Narrative Informationen sowie Einschätzungen von an der Analyse beteiligten Fachleuten; wird im Rahmen von Workshops, Telefongesprächen, Interviews, Abfragen etc. erhoben.
Expertenworkshop	Workshop, an dem (auch) externe Expertinnen und Experten teilnehmen.
Extensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch textliches Zusammenfassen vorhandener Informationen und Expertenwissens.
Externe Expertinnen und Experten	Fachliche Experten und Expertinnen, die keine Bundesoberbehörden oder Bundesinstitutionen vertreten.
Fachleute	Vertreter und Vertreterinnen der Netzwerkpartner und externe Expertinnen und Experten, die die Bearbeitung einer Klimawirkung fachlich begleiten.
Fachliche Analyse einer Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Funktionsfähigkeit eines Teilsystems innerhalb eines Handlungsfeldes. Die Analyse erfolgt auf Grund von Fakten und Informationen (Indikatoren, Modellergebnissen, Expertenwissen, Literatur).
Faktor	Die Sensitivität, die räumliche Exposition und die Anpassungskapazität können nicht direkt in ihrer Ausprägung eingeschätzt werden. Stattdessen werden ihnen Faktoren zugeordnet, die eingeschätzt werden können (Beispiel: für Sensitivität: Altersstruktur der Bevölkerung; für räumliche Exposition: Vorkommen von landwirtschaftlichen Nutzflächen; für Anpassungskapazität: Ausbaumöglichkeiten beim Hochwasserschutz). Diese Faktoren können wiederum durch Indikatoren messbar gemacht werden.
Gewissheit	Die Gewissheit stellt die Sicherheit der Bewertungsergebnisse, basierend auf dem Vorhandensein von Daten, der Zuverlässigkeit der verwendeten Daten, Kenntnissen über Wirkzusammenhänge, der Genauigkeit und Plausibilität von Modellannahmen und der Eindeutigkeit von Trends dar.
Handlungserfordernis	Das Handlungserfordernis ergibt sich aus den Ergebnissen der Untersuchung einer Klimawirkung ohne weitere Anpassung und der Untersuchung der notwendigen Anpassungsdauer.
Indikator	Quantitative, qualitative oder binäre Variable, die gemessen oder beschrieben werden kann, um Aussagen zu einem festgelegten Kriterium zu treffen (angelehnt an ISO 14091). Indikatoren, die nur näherungsweise Aussagen zu einem Kriterium ermöglichen, werden Proxy-Indikatoren genannt.

Begriff	Erläuterung
Intensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch die Spezifizierung der Wirkung, des Zielsystems, der Faktoren und Indikatoren, Analyse und ggf. Datenaufbereitung, textliche und ggf. kartographische Darstellungen.
Klimarisiko	Das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Zu den relevanten nachteiligen Folgen gehören solche auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte und Investitionen, Infrastruktur, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemleistungen), Ökosysteme und Arten. Im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich Risiken aus dynamischen Wechselwirkungen zwischen klimatischen Einflüssen und der räumlichen Exposition sowie der Sensitivität und Anpassungskapazität des betroffenen menschengemachten oder natürlichen Systems. Alle diese Komponenten können jeweils Unsicherheiten in Bezug auf das Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unterliegen und können sich im Laufe der Zeit und des räumlichen Bezugs aufgrund von sozio-ökonomischen Veränderungen und menschlichen Entscheidungen ändern. Im Kontext der KWRA 2021 wird der Begriff Klimarisiko angelehnt an die Definition des IPCC ab dem Zeitpunkt verwendet, ab dem eine Bewertung durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ erfolgt (ist).
Klimarisiko mit Anpassung	Ergebnis eines normativen Bewertungsprozesses. Stellt das eingeschätzte Klimarisiko in Bezug auf eine Klimawirkung oder ein Handlungsfeld unter Berücksichtigung von Anpassung dar.
Klimarisiko ohne Anpassung	Ergebnis eines normativen Bewertungsprozesses. Stellt das eingeschätzte Klimarisiko in Bezug auf eine Klimawirkung oder ein Handlungsfeld ohne Berücksichtigung möglicher Anpassungsmaßnahmen dar.
Klimatischer Einfluss	Ein sich ändernder Aspekt des Klimasystems, der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst (Agard et al. 2014).
Klimawirkung	Die potenziellen oder realisierten Folgen von Klimarisiken auf natürliche und menschengemachte Systeme. Klimawirkungen beziehen sich im Allgemeinen auf Auswirkungen auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, Ökosysteme und Arten, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemdienstleistungen) und Infrastruktur. Sie können als Folgen oder Ergebnisse bezeichnet werden und nachteilig oder vorteilhaft sein. In der KWRA 2021 wird der Terminus Klimawirkung angelehnt an die Definition des IPCC bis zu dem Zeitpunkt verwendet, an dem eine Bewertung des Klimarisikos stattfindet.
Mitte des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2031 bis 2060.
Narrative Informationen	Informationen, die die Interpretation von Daten und fachlichen Analysen unterstützen. Narrative Informationen können beispielsweise Beschreibungen von Wirkzusammenhängen, Zuständen oder Problemlagen sein. Die Quelle kann neben den beteiligten Fachleuten auch die Fachliteratur sein.

Begriff	Erläuterung
Netzwerkpartner und -partnerinnen	Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen, die Mitglied im Behörden- netzwerk „Klimawandel und Anpassung“ sind. Als fachlich begleitende Netzwerkpartner werden Netzwerkpartner und -partnerinnen bezeichnet, die auf der fachlichen Analyseebene für ein bestimmtes Handlungsfeld an der KWRA 2021 mitwirken.
Netzwerktreffen	Treffen des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“.
Operationalisierung	Vorgehen für die fachliche Analyse einer Klimawirkung.
Optimistischer Fall	Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden weniger negativen Klimawirkung verbunden ist und die günstigere Szenarienkombination mit geringeren Ri- siken oder höheren Chancen im Vergleich zur pessimistischen Szenarien- kombinationen darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Ab- stimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der optimisti- sche Fall die Kombination aus dem 15. Perzentil des RCP8.5 und dem Trend-Szenario.
Pessimistischer Fall	Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden stärker negativen Klimawirkung verbunden ist und die ungünstigere Szenarienkombination mit höheren Ri- siken oder niedrigeren Chancen im Vergleich zur optimistischen Szenarien- kombinationen darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Ab- stimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der pessimisti- sche Fall die Kombination aus dem 85. Perzentil des RCP8.5 und dem Dy- namik-Szenario.
Projektion	Möglicher zukünftiger Zustand einer oder mehrerer Größen, üblicherweise erstellt mit einem Modell basierend auf einem Szenario.
Qualitative Daten	Daten, die nicht auf einer Messskala geordnet werden können, sondern zum Beispiel Zustände oder Situationen beschreiben (zum Beispiel Ge- schlecht, Familienstand, Wohnort etc.); können anhand von Kategorien verglichen werden, das heißt nominalskalierte Daten.
Qualitative Methoden	Methoden, die der Erhebung von Einschätzungen und narrativen Informa- tionen dienen; vor allem Interviews, Telefonkonferenzen, darüberhinaus- gehende Gespräche mit Fachleuten (zum Beispiel im Rahmen von Work- shops) und Literaturrecherchen.
Quantitative Daten	Daten, die auf einer Messskala geordnet und anhand dieser verglichen werden können (zum Beispiel Einkommen, Entfernungen, Gebietsgrößen, Zensuren etc.).
Quantitative Methoden	Mathematische Auswertung sowie rechnerische Zusammenführung von Daten und Einschätzungen.
Räumliche Exposition	Vorhandensein von Systemen wie Menschen, Existenzgrundlagen, Arten bzw. Ökosystemen, Umweltfunktionen, -leistungen und -ressourcen, Infra- struktur oder ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Ge- genden und Umständen, die betroffen sein könnten (angelehnt an ISO

Begriff	Erläuterung
	14091; Agard et al. 2014). Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel Einwohnerdichte oder Vorkommen kritischer Infrastruktur.
Sensitivität	Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor- oder nachteilig beeinflusst wird (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014). Faktoren für Sensitivität sind zum Beispiel Baumartenzusammensetzung oder Altersstruktur der Bevölkerung.
Spezifische Klimawirkung	Eine für die Bearbeitung in der KWRA 2021 gegenüber einer allgemeiner beschriebenen Klimawirkung weiter spezifizierte Klimawirkung. Die Spezifizierung erfolgt über eine genaue Beschreibung des Teilsystems, der Auswahl von Faktoren und Indikatoren sowie des Zielsystems der fachlichen Analyse.
Spezifizierung	Die Eingrenzung einer zu untersuchenden Klimawirkung, sodass sie mit den vorgesehenen Methoden und vertretbarem Aufwand operationalisierbar ist. Die Spezifizierung erfolgte im Rahmen der KWRA 2021 auf Basis vorhandenen Wissens, vorhandener Daten und der Relevanz einzelner Teilsysteme beziehungsweise Wirkmechanismen.
Systembereiche	Um eine Spezifizierung der jeweils betroffenen Systeme zu ermöglichen, wurden die in der KWRA 2021 untersuchten Klimawirkungen in fünf Systembereiche eingeteilt: Natürliche Systeme und Ressourcen, naturnutzende Wirtschaftssysteme, Infrastrukturen und Gebäude, naturferne Wirtschaftssysteme, Menschen und soziale Systeme
Szenarienkombination	Kombinationen aus Klima- und sozioökonomischen Szenarien, das heißt aus dem 15. oder 85. Perzentil des RCP8.5 auf der einen Seite und den sozioökonomischen Projektionen für die Mitte des Jahrhunderts (Szenario „Trend“ oder Szenario „Dynamik“) auf der anderen Seite.
Szenario	Beschreibung einer möglichen Zukunft durch Text und/oder die zeitliche Entwicklung von Kennzahlen.
Teilsystem	Teilsysteme unterteilen eine Klimawirkung in thematischer oder räumlicher Hinsicht in verschiedene potenziell durch den Klimawandel betroffene Systeme (Beispiel: „Nordseeküste“ und „Ostseeküste“ oder „Steilküsten“ und „Watt“ als Teilsysteme für die Klimawirkung „Naturräumliche Schäden an Küsten“).
Trend-Szenario der sozioökonomischen Projektionen	Für die KWRA 2021 entwickeltes sozioökonomisches Szenario, das eine zukünftige sozioökonomische Entwicklung beschreibt, die einer Fortsetzung der aktuell beobachteten Entwicklung entspricht.
Vorgelagerte Wirkung	Ein auslösender Faktor, der zu einer relevanten Klimawirkung führen kann (zum Beispiel Hochwasser als vorgelagerte Wirkung für Schäden an Infrastrukturen). Daten und Informationen zu den vorgelagerten Wirkungen werden als Input für die fachliche Analyse und Bewertung von nachgelagerten Wirkungen verwendet, können aber auch selbst eingeschätzt und bewertet werden. Die Entscheidung hierzu fällt bei der Spezifizierung.
Weiterreichende Anpassung	Die maximal mögliche konventionelle Anpassung, also gezielte Klimaanpassungsmaßnahmen, die über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehen und unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen

Begriff	Erläuterung
	und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden können. Weiterreichende Anpassung schließt in diesem Verständnis die beschlossenen Maßnahmen mit ein (siehe auch die Definition der beschlossenen Maßnahmen).
Wirksamkeit von Anpassung	Ausmaß, in dem Anpassung (beschlossene Maßnahmen oder weiterreichende Anpassung) das Klimarisiko reduziert.
Wirkungskette	Analytischer Ansatz, der das Verständnis ermöglicht, wie gegebene klimatische Einflüsse und ggf. vorgelagerte Klimawirkungen direkte und indirekte Auswirkungen erzeugen, welche sich über ein dieses Gefahren ausgesetztes System fortpflanzen (angelehnt an ISO 14091).
Zielsystem	Beschreibt die Zustände eines potenziell betroffenen Systems, die einer bestimmten Kategorie der Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Systems auf Grund des Klimawandels entsprechen.

Zusammenfassung

Hintergrund

Im Auftrag der Bundesregierung und im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wurden im Rahmen der KWRA 2021 sowohl die mit dem Klimawandel verbundenen zukünftigen Risiken für Deutschland untersucht und bewertet als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren, analysiert und die Wirksamkeit der Anpassung eingeschätzt. Die KWRA 2021 zielt darauf ab, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung.

Um Unsicherheiten und realistische Bandbreiten bezüglich der Zukunftsaussagen abzubilden, wurden zwei Fälle betrachtet: ein „pessimistischer“ Fall mit einem starken Wandel und ein „optimistischer“ Fall mit einem demgegenüber schwächeren Wandel. Hinsichtlich der Anpassungskapazität wurden mögliche Entwicklungen präzisiert, indem zwischen beschlossenen Maßnahmen und weiterreichender Anpassung unterschieden wurde. Grundlage der beschlossenen Maßnahmen ist der Aktionsplan Anpassung III (der Bundesregierung). Weiterreichende Anpassung umfasst neben den beschlossenen auch darüberhinausgehende Maßnahmen, deren Umsetzung unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden kann.

Im (vorliegenden) Teilbericht 5 werden Klimarisiken und Anpassung in den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“, „Tourismuswirtschaft“ sowie „Menschliche Gesundheit“ betrachtet.

Handlungsfeld Industrie und Gewerbe

Die deutsche Wirtschaft ist in den letzten zehn Jahren stetig gewachsen. Dabei ist die Industrie für einen hohen Anteil der Bruttowertschöpfung verantwortlich und auch der Anteil des verarbeitenden Gewerbes an der Bruttowertschöpfung ist EU-weit vergleichsweise hoch. Zudem ist Deutschland als Exportnation stark in internationale Wertschöpfungsketten eingebunden. Damit ist das Handlungsfeld auf vielfältige Weise von den Folgen des Klimawandels, sowohl im In- wie auch im Ausland, betroffen. Mögliche Risiken durch Klimawandelfolgen beziehen sich auf verschiedene Bereiche der industriellen und gewerblichen Wertschöpfungskette wie etwa die Eingangslogistik (Verfügbarkeit von Rohstoffen und Zwischenprodukten, Bedingungen des Warentransports), die Produktion (Leistungen von Beschäftigten, Verfügbarkeit produktionsbedingter Ressourcen wie Energie und Wasser) oder den Absatzmarkt.

Die zukünftige Versorgung deutscher Unternehmen mit Rohstoffen und Zwischenprodukten kann insbesondere durch die Auswirkungen klimatischer Einflüsse in klimavulnerablen Ab- und Anbauländern beeinträchtigt werden. Rohstoffe wie Kakao, Kaffee, Tee, Mate, Kautschuk und Baumwolle weisen dabei hohe Vulnerabilitäten auf. Zwischenprodukte erreichen geringere Vulnerabilitätswerte, haben jedoch im Vergleich zu Rohstoffen eine höhere Marktkonzentration. Sind mehrere Zuliefererländer gleichzeitig von den Auswirkungen klimatischer Einflüsse betroffen, kann dies die Gesamtbeeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten erhöhen.

Auch der Handel mit klimavulnerablen Ländern zeigt für deutsche Unternehmen Risiken wie Nachfrageänderungen und Verschiebungen zukünftiger Absatzmärkte auf. Hier wurden für verschiedene Wirtschaftszweige des Maschinenbaus mittlere bis hohe Vulnerabilitätswerte ermittelt. Aufgrund niedrigerer Marktkonzentrationswerte der Absatzmärkte sind von Nachfrageänderungen vermutlich nur geringe Absatzmengen je Land betroffen. Chancen durch die Erschließung neuer Absatzmärkte ergeben sich besonders in der Bau- und Chemiebranche. Für innovative Umwelttechnologien wird bis 2025 ein starkes Marktwachstum erwartet. In diesem Bereich

besitzen insbesondere kleine und mittlere deutsche Unternehmen ein hohes Innovationspotenzial.

Zu klimawandelbedingten Beeinträchtigungen des Warentransports kann es sowohl im In- wie im Ausland kommen. Zunehmende Risiken ergeben sich für den das weltweite Handelsvolumen dominierenden internationalen Schiffsverkehr. Der internationale Flug-, Straßen- und Schienenverkehr kann zunehmend durch die Folgen extremer Wetterereignisse beeinträchtigt werden. Im inländischen Warenverkehr über Wasserstraßen kann es bei extremen Niedrigwasserständen zu einer Verringerung der Transportmenge, Lieferverzögerungen oder Umladungen auf andere Verkehrsträger kommen. Projektionen für den Rhein zeigen, dass die mittleren Beladungsgrade bis zum Ende des Jahrhunderts abnehmen. Dies kann zu erhöhten Kosten für den Warentransport führen. Im landgestützten Warenverkehr schließlich kann eine Zunahme an Starkniederschlägen und Heißen Tagen kurze Unterbrechungen der Transportinfrastruktur bedingen.

Der Klimawandel wirkt sich zudem auf den Bedarf und die Verfügbarkeit produktionsbedingter Ressourcen aus. Die Energieversorgung deutscher Unternehmen kann auch in Zukunft als weitgehend stabil angesehen werden. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass durch extreme Wetterereignisse zunehmend ausgelöste Schwankungen des Strompreises zu höheren Energiekosten, besonders für energieintensive Branchen, führen können. Unsicherheiten ergeben sich durch den geplanten Netzausbau im Rahmen der Energiewende, welcher zu einer erhöhten Störanfälligkeit des Netzes führen kann. Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf an Kühlwasser für thermische Kraftwerke, der derzeit einen bedeutenden Anteil des Wasserbedarfs ausmacht, infolge der Energiewende in Zukunft weiter abnimmt. In einigen Branchen mit wasserhaltigen Produkten, wie der Nahrungsmittel- und Getränkeproduktion, könnten steigende Temperaturen zu einem erhöhten Wasserbedarf führen, der nicht durch Effizienzsteigerungen substituierbar ist.

Chemie- und Kläranlagen sind durch zunehmende Starkniederschläge und an den Küsten durch die Folgen des Meeresspiegelanstiegs von erhöhten Risiken der Freisetzung gefährlicher Stoffe durch Überflutungen betroffen. In bebauten Gebieten kann bei durch Starkniederschlägen überlasteten Kanalisationen unbehandeltes Abwasser austreten beziehungsweise oberflächlich abfließen und in Gewässer gelangen. Längere Hitzeperioden können zu höherer Aufheizung von Anlagenteilen führen. Sind darin thermisch sensible Stoffe, so können diese zu reagieren beginnen und Stofffreisetzungen auslösen.

Infolge der steigenden durchschnittlichen Lufttemperaturen und häufiger auftretenden Hitzeperioden ist mit einer Zunahme an Leistungseinbußen von Beschäftigten, die in Innenräumen arbeiten, zu rechnen. Durch häufigere und stärkere Extremwetterereignisse können Leistungseinbußen durch Unfälle oder gesundheitliche Belastungen von im Freien Beschäftigten zunehmen.

Die genannten Auswirkungen des Klimawandels auf industrielle Wertschöpfungsketten können dazu führen, dass Produktionsprozesse beeinträchtigt werden und der Aufwand für die betriebliche Planung zunehmen wird.

Die Betroffenheit deutscher Unternehmen von den Folgen des Klimawandels ist abhängig von verschiedenen Faktoren. So tragen beispielsweise der Wirtschaftszweig, die Unternehmensgröße, die internationale Ausrichtung des Unternehmens oder die Innovationsfähigkeit zur Betroffenheit bei und sind gleichzeitig auch wichtige Ansatzpunkte für Anpassung und für die Stärkung der Anpassungskapazität. Hinsichtlich der Beeinträchtigung des inländischen Warenverkehrs über Wasserstraßen sind beispielsweise die Fahrwasserbedingungen der Bundeswasserstraßen und deren Einzugsgebietseigenschaften sowie die Lage großer Industriestandorte wichtige Faktoren der räumlichen Exposition. Die Sensitivität der Binnenschifffahrt gegenüber hoch- und niedrigwasserbedingten Einschränkungen wird unter anderem durch die Einzugsgebietsei-

genschaften (inklusive der installierten Bewirtschaftungsmaßnahmen) und die Fahrwassereigenschaften (Tiefe und Breite, Wasserstraßenmanagement, Brückenhöhen) beeinflusst. Bezüglich der Versorgung mit internationalen Rohstoffen und Zwischenprodukten sind beispielsweise der Anteil der Importe aus klimavulnerablen Ländern, der Anteil der Rohstoffe und/oder Zwischenprodukte mit geringen Substitutionsmöglichkeiten sowie die Marktkonzentration der Importe relevante Faktoren der Sensitivität.

Das Handlungsfeld weist ein vielfältiges Bild der Möglichkeiten zur Anpassung auf, wobei der APA III vergleichsweise viele Maßnahmen aufführt. Diese stehen im Zusammenhang mit Maßnahmen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ oder beziehen sich auf wetterbedingte Extremereignisse und deren Auswirkungen auf Industriestandorte und -gebäude, den Arbeitsschutz, die Anlagensicherheit und die Sicherung von gefährlichen Stoffen.

Aufgrund der hohen Heterogenität der deutschen Industrie und des Gewerbes und damit einhergehend der im Handlungsfeld untersuchten Klimawirkungen, ergibt sich auch ein breites Feld möglicher weiterreichender Anpassungsmöglichkeiten. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere Anpassung durch den Bund im Rahmen staatlichen Handels betrachtet wird. Autonome Anpassung der Unternehmen selbst kann durch diese Maßnahmen angestoßen und die Rahmenbedingungen zur Anpassung können verbessert werden. Beispiele hierfür sind Informationskampagnen, Beratungsangebote, Anpassungsprämien oder gezielte Fördermittel. Auch regulatorische Marktveränderungen, wie beispielsweise Sicherheitsstandards im Rahmen von Bauvorschriften, schaffen einen Handlungsrahmen für Anpassung. Zusätzlich zu den genannten Maßnahmen können Anpassungsleitfäden für Industrie und Gewerbe als Richtschnur für Anpassung dienen und die erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen beeinflussen. Obgleich kleinere Unternehmen oft flexibler auf Änderungen reagieren können als Großunternehmen mit komplexen Organisationsstrukturen, können kleine und mittlere Unternehmen verstärkt finanziellen Hindernissen der Umsetzung ausgesetzt sein. Ein weiteres Hindernis der Anpassung im Handlungsfeld können die verschiedenen zeitlichen Planungshorizonte im Bereich der Unternehmen und im Bereich des staatlichen Handelns darstellen, da Maßnahmen gegebenenfalls nicht zum benötigten Zeitpunkt abgerufen werden können. Anpassung im Handlungsfeld kann an seine Grenzen stoßen, sofern staatliche Maßnahmen zur Schaffung von Marktgleichgewichten führen oder sich Anpassung für Unternehmen als nicht mehr rentabel erweist. Zur Stärkung der Anpassungskapazität trägt besonders das Querschnittsfeld der Finanzwirtschaft durch die Vermittlung von Versicherungen für physische Klimarisiken bei. Anreize zur Anpassung können auch durch Vorgaben bei der Vergabe von Krediten oder Investitionen gesetzt werden. Die Regionalplanung kann speziell bei räumlichen Anpassungsprozessen, welche eine Flächennutzungsänderung erfordern, unterstützen.

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“ und „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ analysiert und eingeschätzt. Das Klimarisiko der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“ könnte im pessimistischen Fall durch die Umsetzung weiterreichender Anpassung auf „mittel-hoch“ reduziert werden.

Während die beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ im pessimistischen Fall auf „mittel-hoch“ senken könnten, könnte mit weiterreichender Anpassung eine Reduktion auf ein mittleres Klimarisiko erreicht werden. Die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ wird als sehr dringendes Handlungserfordernis, da bereits für die Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall das Klimarisiko als „hoch“ bewertet wurde und viele Maßnahmen einen deutlichen zeitlichen Vorlauf benötigen könnten (bis zu 50 Jahre).

Dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkungen „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“, „Beeinträchtigung des internationalen Warentransports“, „Wasserbedarf“ und „Leistungseinbußen von Beschäftigten“.

Handlungsfeld Tourismuswirtschaft

Da eine Vielzahl von touristischen Aktivitäten im Freien stattfindet, ist der Tourismussektor in Deutschland¹ (sowohl angebots- als auch nachfrageseitig) zu einem nicht unwesentlichen Teil wetterabhängig und wird dementsprechend auch von klimatischen Veränderungen beeinflusst. Bestimmte touristische Angebote basieren außerdem auf naturräumlichen Besonderheiten oder der landschaftlichen Attraktivität einer Region. Somit können sich klimawandelbedingte Veränderungen, die das Erscheinungsbild einer Landschaft beeinträchtigen oder die Charakteristik bestimmter Naturräume sichtlich umformen, auch auf den Tourismussektor auswirken. Einen Einfluss haben – je nach Tourismusart und -region – vor allem die Lufttemperatur und damit verknüpft das Schneevorkommen sowie die Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen wie Hitzeperioden, Trockenheit, Starkregen oder Überschwemmungen. Außerdem können naturräumliche Veränderungen (zum Beispiel an Küsten), die Beeinträchtigung der Badegewässerqualität oder der Luftqualität oder ähnliche, teils klimawandelbedingt auftretende Prozesse touristische Angebote einschränken und/oder die touristische Nachfrage mindern. Allerdings können sich neben Risiken aus klimatischen Veränderungen auch Chancen für den Tourismussektor ergeben, beispielsweise durch die Verlängerung der Bade- und Wandersaison. Insgesamt ist der Einfluss des Klimawandels auf die Tourismuswirtschaft als einer unter etlichen Faktoren zu sehen, die auf die Nachfrage, das Angebot und die Arbeitsmarktsituation im Tourismussektor einwirken. So begründen insbesondere soziodemographische und sozioökonomische Umstände, wie Alters-, Bildungs- und Haushaltsstruktur sowie Haushaltseinkommen, die Multikausalität der touristischen Nachfrage.

Für den Wintertourismus zeigt sich folgendes Bild: Sowohl Zeiträume mit Winteratmosphäre als auch die natürliche Schneewahrscheinlichkeit im (aktuell) Wintertourismus-kritischen Zeitraum gehen flächendeckend deutlich zurück. Die Gebiete, in denen die Schneewahrscheinlichkeit gleich (hoch) bleibt, sind bereits zur Mitte des Jahrhunderts sehr begrenzt (vor allem auf die deutschen Alpen). Die Betroffenheit der Tourismuswirtschaft ist besonders hoch, wenn regional/lokal die Reiseanbieter sehr spezialisiert und zudem die Gesamtwertschöpfung aus dem Tourismus sehr hoch ist.

Für touristische Infrastrukturen und Betriebe im Küstenraum können erhebliche Schäden von stärkeren Sturmfluten, dem Meeresspiegelanstieg und der Küstenerosion ausgehen. Außerdem können die Klimawandelbedingt zunehmende Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen, Stürmen, Trockenperioden oder Hoch- und Niedrigwasser Unterbrechungen der touristischen Nutzung zum Beispiel von Wander-, Rad-, Waldwegen, Skipisten oder Gewässern nach sich ziehen.

Wirtschaftliche Chancen und Risiken für Tourismusanbieter ergeben sich aus den klimawandelbeeinflussten Perioden/Dauern saisonaler Angebote. Eine positive Wirkung könnte von der Ausweitung der Rad-, Wander- und Badesaison ausgehen – wobei letztere durch die Minderung der Badegewässerqualität beeinträchtigt sein könnte. Gleichzeitig führt die Veränderung der naturräumlichen Ausstattung, zum Beispiel in bisherigen Skigebieten, zu betrieblichen Risiken aufgrund der Verkürzung oder des Ausbleibens der Wintertourismussaison.

¹ Alle Aussagen beziehen sich auf den Urlaubs- und Freizeittourismus in Deutschland sowohl von in Deutschland ansässigen als auch von ausländischen Reisenden; nur Reisen, die Übernachtungen beinhalten; nicht berücksichtigt werden Reisen aus Deutschland ins Ausland.

Die Auswirkungen des Lufttemperaturanstiegs infolge des Klimawandels auf die unterschiedlichen Arten des Gesundheitstourismus lassen räumliche Unterschiede erkennen: Während Veränderungen des Bioklimas mit Beeinträchtigungen im Kurtourismus einhergehen können, können sich Temperaturveränderungen teils auch positiv auf den Gesundheitstourismus auswirken.

Neben klimatischen Veränderungen wirken sich der demographische Wandel und sozioökonomische Trends entscheidend auf die Nachfrageentwicklung im Tourismussektor aus. Der Einfluss des Klimawandels auf Reiseentscheidungen wird im Gesamtzusammenhang der zahlreichen Faktoren, die die touristische Nachfrage beeinflussen, auch weiterhin eine nachgeordnete Rolle spielen.

Je nach Tourismusart sind die Höhenlage (bisher „klassische“ Wintertourismusdestinationen: Mittelgebirge, Alpen, Alpenvorland) oder die relative Entfernung zu Gewässern/Küstennähe Faktoren der räumlichen Exposition im Tourismussektor. Die Sensitivität ist auf Angebots- und Nachfrageseite an soziodemographische und sozioökonomische Merkmale geknüpft; außerdem spielt angebotsseitig der Spezifizierungs- bzw. Diversifizierungsgrad eine entscheidende Rolle. Zum Beispiel muss in Mittelgebirgsregionen bereits seit längerem mit unsicheren Wintersportbedingungen umgegangen werden, sodass eine gewisse Diversifizierung des touristischen Angebots vollzogen wurde, während in den Alpinskieregionen nicht wenige Anbieter fast ausschließlich vom Skitourismus leben.

Die Multikausalität von Reiseentscheidungen erschwert Prognosen für und die gezielte Steuerung von nachfrageseitiger Anpassung an den Klimawandel, sodass Anpassungsmöglichkeiten vor allem auf der Angebotsseite bestehen. Dabei sind bereits erprobte und etablierte Mechanismen des Risikomanagements relevant. Bestimmte Strategien und einzelne Maßnahmen finden bereits Anwendung, zum Beispiel die Aufklärung und Sensibilisierung von Tourismusakteuren sowie die strukturierte Vorbereitung auf Extremereignisse und Katastrophenfälle. Beschlossene Maßnahmen zielen vor allem auf Wissensgenerierung und -bereitstellung sowie Bewusstseinsstärkung ab. Dies umfasst die Bereitstellung von Leitfäden zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen, Online-Informationsportale (wie den regionalen Klimaatlas) sowie die Bereitstellung von meteorologischen Daten und die Klimaanpassungsberatung durch das „Climate Data Center“ des Deutschen Wetterdienstes.

Weiterreichende Anpassung kann sowohl auf Ebene der Destinationsmanagementorganisationen (DMO) als auch auf betrieblicher Ebene ansetzen. Eine hilfreiche Strategie kann dabei die Angebotsdiversifizierung sein. In Wintertourismusdestinationen in deutschen Mittelgebirgen wird dies mit einer Angebotserweiterung um sommerliche Outdoor-Aktivitäten bereits verfolgt, was sich auch für die deutschen Alpen anstelle oder zusätzlich zu technischen Anpassungsmaßnahmen wie dem Schneemanagement als sinnvoll erweisen könnte. Ähnliches gilt für Küstenregionen (wegen des Meeresspiegelanstiegs) oder auf Wandertourismus spezialisierte Destinationen (beispielsweise Hitze- und Trockenheitsschäden). Angebotsdiversifizierung kann auch den Ausbau des kulturellen Angebots oder die Vermarktung regionaler Produkte beinhalten. Flexibilität scheint neben Vielseitigkeit im Angebot angesichts der Heterogenität von Reiseentscheidungen besonders wichtig. Während die DMO wichtige Impulse für die Konzipierung und Umsetzung von Anpassung geben können, beruhen Anpassungsprozesse auf dem Zusammenspiel verschiedener Akteure und erfordern daher entsprechende Koordination und Kooperation. Insgesamt stellen organisatorische Maßnahmen sowie Wissens-schaffende Maßnahmen, auch auf der Nachfrageseite, wesentliche Komponenten von Anpassungsstrategien dar, aber auch finanzielle Ressourcen sind von großer Bedeutung.

Zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld trägt vor allem das Querschnittsfeld „Raumordnung“ durch Regelungen der Flächennutzung bei, Beiträge könnten aber auch vom Finanzbereich geleistet werden, beispielsweise durch eine Erweiterung des bestehenden Versicherungsangebots.

Für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ wurden keine Klimawirkungen zur Analyse der Anpassungskapazität ausgewählt. Bewertet wurde daher lediglich die Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes. Für das Handlungsfeld liegen keine sehr dringenden Handlungserfordernisse vor. Ein dringendes Handlungserfordernis ergibt sich für die Klimawirkung „Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft“.

Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

Das menschliche Wohlbefinden und die menschliche Gesundheit werden von Wetter und Witterung beeinflusst. Sie können sich sowohl auf den Körper als auch auf die Psyche auswirken und in extremen Fällen direkt oder indirekt zum Tod führen. Insbesondere die steigenden Temperaturen spielen als klimatischer Einfluss eine wesentliche Rolle für die Gesundheit der Menschen. Hitze belastet das Herz-Kreislaufsystem und kann zu aggressivem Verhalten führen. Andere Wetterextreme, die die menschliche Gesundheit gefährden können, sind Frost, Starkwinde und Überschwemmungen aufgrund von Hochwasser oder Starkregen. Indirekt kann der Klimawandel Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben, indem er Allergien sowie Krankheitserreger oder deren Überträger begünstigt oder die UV-Strahlungsbelastung erhöht.

Die Hitzebelastung wird zunehmen. Ursache dafür ist nicht nur die steigende Anzahl von Hitzeperioden im Jahr und ihre längere Dauer. Die Verdichtung von Innenstädten und die zunehmende Konzentration der Bevölkerung in größer werdenden Ballungszentren tragen ebenfalls dazu bei. Die Verdichtung von Innenstädten wird den Wärmeinseleffekt noch verstärken, während das Wachstum der Städte ins Umland die Fläche der Wärmeinseln vergrößert. Gleichzeitig steigt die Sensitivität der Bevölkerung im Zuge des demographischen Wandels: Menschen im Alter von 75 Jahren und darüber gelten als besonders sensitiv gegenüber Hitze, ebenso wie Menschen mit verschiedensten Vorerkrankungen. Andere Extremereignisse, die häufiger und intensiver werden könnten, sind Starkregen und Hagel. Für einzelne Wetterextreme wie Sturm sind die Projektionen noch uneindeutig. Insgesamt aber gilt, dass mit der zunehmenden Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen die Gefahr steigt, dass Menschen verletzt oder getötet werden.

Infolge des Klimawandels beginnt die Pollensaison früher und dauert länger an. In manchen Jahren geht schon heute eine Pollensaison direkt in die nächste über; Pollenallergikern fehlt so die allergiefreie Pause. Die in der KWRA 2021 detaillierter betrachtete Erle eröffnet zusammen mit der Hasel als Frühblüher die Pollensaison. Sie könnte am Ende des Jahrhunderts im deutschlandweiten Mittel um circa zwei Wochen früher blühen. Die Verschiebung des Blühbeginns wäre in den Höhenlagen besonders deutlich. Es wird darüber hinaus erwartet, dass Pflanzen künftig mehr und stärker allergene Pollen freisetzen. Durch die sich verschiebenden Vegetationszonen kann sich darüber hinaus das Pollenspektrum verschieben.

Die zunehmenden Temperaturen begünstigen bestimmte Mikroorganismen und Algen in ihrem Wachstum und ihrer Verbreitung. Dabei gilt wie für andere Lebewesen, dass verschiedene Protozoen, Bakterienstämme, Algen- oder Pilzarten unterschiedliche Ansprüche an die Temperatur und die Feuchtigkeit stellen. Häufig aber befördert eine wärmere Umgebung das Wachstum beziehungsweise die Vermehrung. Als Beispiel für durch Wärme begünstigte Mikroorganismen wird in der KWRA 2021 die Bakteriengattung *Vibrio* beschrieben. Vibrionen kommen natürlicherweise in Brack- und Meerwasser vor und können tödliche Infektionen hervorrufen. Dabei ist ihr Infektionspotenzial von der Wassertemperatur abhängig. Mit der Erwärmung der Meere

könnte die Zahl der Infektionen durch Vibrionen steigen. Zudem wird die Bevölkerung insgesamt älter und damit potenziell sensitiver.

Nicht nur Mikroorganismen auch Krankheitsüberträger wie Mücken, Zecken und Mäuse werden in ihrer Verbreitung, Abundanz und Aktivität von Witterung und Klima beeinflusst. Unter den heimischen Vektoren könnten insbesondere die Schildzecken vom Klimawandel profitieren. Dies würde sich unter anderem in einer Verlängerung ihrer Aktivitätsperiode äußern oder in der erhöhten Abundanz bisher wenig verbreiteter Schildzeckenarten. Relevant könnte darüber hinaus die zunehmende Verbreitung bisher nicht einheimischer Vektoren sein. Ihre Einschleppung nach Deutschland ist häufig dem internationalen Personen- und Warenverkehr geschuldet. Auch Wirtstiere schleppen Vektoren ein. Mit dem Klimawandel können sich die Gunsträume für nicht-heimische Arten erweitern, sodass eine Etablierung dieser Arten befördert wird.

UV-Strahlung ist krebserregend und Hauptursache für Hautkrebs. Die Hautkrebsneuerkrankungsraten steigen seit Jahrzehnten an. Mit dem Klimawandel könnte sich die Situation verschärfen, weil die Zahl der Sonnenscheinstunden zu- beziehungsweise die Bewölkung abnimmt (wobei die zukünftige Entwicklung der Bewölkung unsicher ist). Dies erhöht die potenzielle UV-Strahlungsbelastung der Bevölkerung. Das veränderte Klima kann zudem Einfluss auf das Verhalten der Menschen haben, was zu vermehrtem Aufenthalt im Freien und damit zur Erhöhung der UV-Strahlungsbelastung führen könnte. Hinzu kommt, dass die komplexen Wechselwirkungen zwischen Treibhausgasen, Klimawandel und der stratosphärischen Ozonschicht eine Erholung dieser Ozonschicht beeinflussen. Niedrigozonereignisse in der nördlichen Hemisphäre traten in den letzten zwei Jahrzehnten vermehrt auf. Sie können eine signifikant erhöhte UV-Belastung der Bevölkerung zur Folge haben.

Ebenfalls von Wetter und Witterung beeinflusst ist die lokale Schadstoffkonzentration in der Luft. Projektionen gehen davon aus, dass die Emission von Luftschadstoffen und Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon bis zur Mitte des Jahrhunderts zurückgehen. Dennoch könnte die Konzentration von bodennahem Ozon mit den zunehmenden Temperaturen und der zunehmenden Sonnenscheindauer steigen. Die Belastung mit Luftschadstoffen könnte generell auch aufgrund der höheren Anzahl Heißer Tage und der damit verbundenen geringeren Luftzirkulation zunehmen.

Die beschriebenen Klimawirkungen zeigen, dass sich die Zahl wetter- und witterungsbedingter Krankheitsfälle erhöhen könnte. Zudem könnten Extremwetterereignisse häufiger dazu führen, dass Gesundheitseinrichtungen ihren Aufgaben zeitweise nicht in vollem Umfang nachkommen können, weil sie überlastet sind oder die notwendige Infrastruktur ausfällt. Der Klimawandel erfordert Investitionen in das Gesundheitssystem, insbesondere in Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten, Präventionskampagnen, Forschung und die Zuverlässigkeit von Infrastrukturen.

Grundsätzlich kann jeder Mensch von wetter-, witterungs- und klimabeeinflussten Krankheiten betroffen sein. Dennoch gibt es Bevölkerungsgruppen, die sensitiver gegenüber den gesundheitlichen Folgen des Klimawandels sind. Dies sind insbesondere aufgrund des Alters oder von Vorerkrankungen (immun)geschwächte Personen. Darüber hinaus gibt es Bevölkerungsgruppen, die gesundheitsgefährdenden Situationen länger und häufiger ausgesetzt sind als andere, beispielsweise Personen, die sich viel im Freien aufhalten. Sensitiv sind Menschen auch dann, wenn ihnen im Schadensfall ein funktionierendes und gut erreichbares Gesundheitssystem fehlt. Dieses steht im Zuge des Klimawandels selbst vor neuen Herausforderungen.

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ zeigt sich eine vergleichsweise große Anzahl und inhaltliche Vielfalt von Möglichkeiten der Klimawandelanpassung, die als wesentliche Elemente Aufklärung, Monitoring von Umwelteinflüssen sowie Standards für Verhaltensregeln und technische Ausstattung beinhalten. Wesentliche Beiträge zur Anpassung durch die Maßnahmen des

Aktionsplans Anpassung (APA III) des Bundes an die als hoch eingeschätzten Klimarisiken „Hitzebelastung“, „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“ und „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ werden in den Bereichen Bildung, Forschung und Monitoring, Information/Aufklärung und Bewusstseinssteigerung geleistet. Anpassung an die zunehmende Belastung durch Hitze und UV-Strahlung kann zudem durch Ergänzungen der Regelungen zum Arbeitsschutz und durch die Bereitstellung zielgruppenspezifischer Informationsmaterialien vollzogen werden. Zum besseren Umgang mit zunehmender Hitzebelastung trägt auch die Anpassung der Informations- und Frühwarnsysteme bei. Anpassungsmaßnahmen an die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ zielen auf die Förderung eines Sensibilisierungsmonitorings und die Untersuchung der Wirkmechanismen neuer Allergene ab. Die Anpassung an die Ausbreitung möglicher Krankheitsüberträger und potenziell schädlicher Mikroorganismen und Algen kann vornehmlich durch Forschung, Monitoringaktivitäten und die Warnung der Bevölkerung beziehungsweise die Ausweisung von Risikogebieten erfolgen.

Während weiterreichende Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ vor allem an die Mobilisierung finanzieller Ressourcen und die Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen geknüpft ist, weisen beispielsweise eine deutliche Änderung des Konsum- und Ernährungsverhaltens sowie Eingriffe in die Siedlungs- und Gebäudegestaltung eine transformative Richtung der Anpassung auf (Minderung der Freisetzung von Schadstoffen und Treibhausgasen, Berücksichtigung der Allergenität von Stadtbäumen/städtischem Grün). Zielkonflikte zwischen anpassungsbezogenen Maßnahmen bestehen beispielsweise hinsichtlich der Anpflanzung möglicherweise allergener Arten oder des Ausbaus blauer Infrastrukturen, welche als potenzielle Verbreitungsorte von Vektoren oder schädlichen Mikroorganismen dienen können.

Der zeitliche Horizont für die Maßnahmen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ wird größtenteils auf weniger als zehn Jahre und in wenigen Fällen auf mehrere Jahrzehnte eingeschätzt.

Aufgrund des als „hoch“ bewerteten Klimarisikos liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis bei den Klimawirkungen „Hitzebelastung“ und „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen“ vor. Während die beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko auf „mittel-hoch“ senken könnten, könnte es durch weiterreichende Anpassung auf „mittel“ gesenkt werden. Ein weiteres sehr dringendes Handlungserfordernis liegt bei der Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ vor. Hier könnten sowohl die beschlossenen Maßnahmen (APA III) als auch weiterreichende Anpassung das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) von „hoch“ auf „mittel“ senken. Dringende Handlungserfordernisse bestehen für die Klimarisiken „Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)“ und „Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“.

1 Einleitung

1.1 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021)

Im Auftrag der Bundesregierung und im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wurden mit der KWRA 2021 zum zweiten Mal nach 2015 die mit dem Klimawandel verbundenen zukünftigen Risiken für Deutschland untersucht und bewertet. Diese Untersuchung, die auf Wunsch der Bundesregierung (Bundesregierung 2015) alle sechs Jahre durchgeführt werden soll, ist die umfassendste Klimawirkungs- und Risikoanalyse in Deutschland.

Im Rahmen der mehr als dreijährigen Erstellung der Studie wurden alle wichtigen Themenfelder zum Klimawandel in Deutschland betrachtet und sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren, analysiert. In die Erstellung der Studie war das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ eng eingebunden. So ist das Wissen von 25 Bundesoberbehörden und -institutionen aus neun Ressorts sowie das Know-how zahlreicher weiterer Experten und Expertinnen in Deutschland in die Studie eingeflossen.

Das zentrale Ziel der KWRA 2021 ist es, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die KWRA 2021 als ein systematischer Screening- und Priorisierungsprozess angelegt worden. Auf Ebene des Bundes schafft die KWRA 2021 einen Überblick, in welchen Handlungsfeldern und bei welchen Klimawirkungen besondere Klimarisiken, Anpassungskapazitäten und Handlungserfordernisse bestehen.

Im Rahmen der KWRA 2021 wurden 13 übergeordnete Handlungsfelder sowie 102 einzelne Klimawirkungen im Hinblick auf die Höhe des Klimarisikos für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts und das Ende des Jahrhunderts bewertet. Schwerpunkt der Untersuchung sowohl in Hinblick auf Klimarisiken ohne Anpassung als auch in Hinblick auf die Anpassungskapazität war die Mitte des Jahrhunderts. Um Unsicherheiten bezüglich der Zukunftsaussagen abzubilden, wurden zwei Fälle betrachtet: ein „pessimistischer“ Fall mit einem starken Wandel und ein „optimistischer“ Fall mit einem demgegenüber schwächeren Wandel. Dabei wurden primär Wirkungen des Klimawandels, aber auch Aspekte des sozioökonomischen Wandels berücksichtigt.

Für die größten Klimarisiken wurden Anpassungsmöglichkeiten identifiziert und für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts daraufhin bewertet, wie stark sie zukünftige Klimarisiken senken können. Hierbei wurden auch Unterstützungsmöglichkeiten durch die drei Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft berücksichtigt.

Insgesamt konnte auf diese Weise ein sehr vielschichtiges und detailliertes Bild der künftigen Situation Deutschlands, der Risiken und Herausforderungen des Klimawandels, möglicher Ansatzpunkte zur Bewältigung der Risiken, aber auch absehbarer Grenzen bei der Anpassung an den Klimawandel gezeichnet werden.

Die vorrangigen Adressaten der Ergebnisse der KWRA 2021 sind die Bundesministerien, die im Rahmen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung (IMA-A) die DAS und damit die deutsche Anpassungspolitik weiterentwickeln. Weitere Zielgruppen sind Bundesbehörden sowie Länder und Kommunen. Die Ergebnisse und die weiterentwickelte Methodik der KWRA 2021 können ihnen sowie anderen Akteuren in der Wirtschaft und Zivilgesellschaft Informationen für eigene Anpassungsplanungen liefern und für detailliertere Klimawirkungs- und Risikoanalysen

als Vorlage dienen. Der Bericht richtet sich daneben an die Wissenschaft. Sie kann an die skizzierten Forschungsbedarfe anknüpfen. Außerdem stellt die vorliegende Analyse der breiten Öffentlichkeit Informationen zur generellen Verwundbarkeit Deutschlands gegenüber dem Klimawandel bereit.

1.2 Die Grenzen der KWRA 2021

Die KWRA 2021 spricht einen sehr breiten Kranz von Klimawandelrisiken an und trifft hierzu Aussagen. Ein wesentlicher Teil der Untersuchung ist außerdem der Analyse der Anpassungskapazität gewidmet. So breit und vielfältig das Spektrum der behandelten Themen und Fragen auch ist, eine Anzahl von Fragen wurden bewusst nicht adressiert.

Ziel der Analyse ist es nicht, auf Basis der identifizierten Klimarisiken konkrete Maßnahmen zur Anpassung herauszuarbeiten oder Empfehlungen diesbezüglich auszusprechen. Die Identifizierung und Ausgestaltung von Anpassungsmaßnahmen sowie ihre Kombination in Maßnahmenbündeln ist Aufgabe nachfolgender Schritte und nicht Gegenstand der KWRA 2021. Letztere stellt hierzu die fachlichen Grundlagen zur Verfügung.

Durch die Breite der vorliegenden Untersuchung können die Ergebnisse der Analyse auch nicht als unmittelbare Grundlage für die regionale oder lokale Anpassungsplanung dienen. Dafür werden detailliertere Risikoanalysen benötigt, die jeweils lokale und sektorale Gegebenheiten beachten. Dies war im Rahmen dieses Berichts nicht möglich.

Aufgabe der KWRA 2021 ist es zudem nicht, bereits sichtbare Klimawirkungen oder den Effekt von Anpassungsmaßnahmen zu untersuchen. Dies erfolgt im Rahmen des Monitoringberichts zur DAS (UBA 2019a) sowie im Rahmen der Evaluation der DAS (UBA 2019b). Die vorliegende Klimawirkungs- und Risikoanalyse ist stattdessen zukunftsgerichtet.

1.3 Methodisches Vorgehen

Aufgrund der Vielfalt der Klimawirkungen, der vielen betroffenen Systeme und Akteure und der Zukunftsperspektive ist jede Klimarisikoanalyse mit zahlreichen methodischen Herausforderungen verbunden. Aufbauend auf der Analyse- und Bewertungsmethodik, die bereits für die Vulnerabilitätsanalyse 2015 (VA 2015) erstellt wurde (Buth et al. 2017), wurde der Heterogenität und den Unsicherheiten der Klimawirkungen bei der Konzeption der Methodik der KWRA 2021 dadurch begegnet, dass ein systematischer, mit den Mitgliedern des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“ abgestimmter Analyserahmen für alle Klimawirkungen verwendet wurde. Er baut auf der IPCC-Definition von Klimarisiko auf (Agard et al. 2014), bei der zwischen den Komponenten: Klimatischer Einfluss, räumliche Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität unterschieden wird (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“). Für jede Klimawirkung wurden die wesentlichen Zusammenhänge zusammengefasst und eine Bewertung durchgeführt. Das Klimarisiko ist das Ergebnis der Bewertung der Klimawirkung.

Systematische Grundlage der Untersuchung sind sektorenübergreifende Klimawirkungsketten, die die Wirkbeziehungen zwischen den verschiedenen klimatischen Einflüssen und möglichen Klimawirkungen sowie die Wirkbeziehungen zwischen vor- und nachgelagerten Klimawirkungen abbilden (UBA 2016).

Entscheidend für die Arbeitsweise im Behördennetzwerk war es, dass die fachliche Analyseebene und die normative Bewertungsebene getrennt behandelt wurden. Die fachliche Analyse beruhte auf Literaturanalysen, Indikatoren und Modellergebnissen sowie Interviews mit Experten und Expertinnen, auch außerhalb des Behördennetzwerks, um den aktuellen Wissensstand schriftlich festzuhalten. Basierend auf solchen gemeinsamen Grundlagen haben die Vertreter

und Vertreterinnen der Behörden die Klimarisiken, die Wirksamkeit von Anpassungskapazitäten und die Anpassungsdauer gemeinsam bewertet. Die Bewertung selber erfolgte in aufeinander aufbauenden Bewertungsschritten, so dass ein Priorisierungsprozess stattfinden konnte. Bei der Bewertung wurde einem Delphi-Verfahren gefolgt, um einen weitgehenden Konsens und damit robuste Ergebnisse zu erzielen.

Der zukünftige Klimawandel ist eine der zentralen Herausforderung für gegenwärtige Entscheidungen. Aussagen über die Zukunft sind immer mit Unsicherheiten behaftet, einerseits infolge fehlender Daten und Modellen sowie Wissenslücken und andererseits, weil jede heutige Entscheidung zu einer etwas anderen Zukunft führt. Dies betrifft nicht nur das Klimasystem, sondern auch sozioökonomischen Entwicklungen und deren Begleiterscheinungen (Ressourcenverbrauch, Umweltbelastung). Um dennoch Aussagen über zukünftige Entwicklungen machen zu können, bedient man sich üblicherweise Szenarien. Im Kontext der KWRA 2021 wurden, neben Klimaszenarien des Weltklimarates (so genannte „Representative Concentration Pathways“, RCPs), auch sozioökonomische Szenarien berücksichtigt, die ebenfalls mit Szenarien des Weltklimarates konsistent sind (sogenannte „Shared Socioeconomic Pathways“, SSPs). Auf dieser Basis wurden "pessimistische" und "optimistische" Szenarienkombinationen skizziert, für Deutschland regionalisiert und der Bewertung von Klimawirkungen zugrunde gelegt.

Die Klima- und sozioökonomischen Szenarien sind jedoch nur relativ grobe Grundlagen für die Abschätzung der ganz spezifischen Auswirkungen auf einzelne Handlungsfelder, Systeme und Regionen. Die KWRA 2021 verwendete die Ergebnisse von Wirkmodellen, die für einige Wirkungszusammenhänge vorliegen, sowie Expertenwissen, das nach einem strukturierten Vorgehen abgefragt wurde. Subjektivität und Unsicherheiten spielen in beiden Fällen eine gewisse Rolle, da einerseits Kennwerte festgelegt werden müssen und andererseits Expertenwissen abhängig ist von der Erfahrung und dem Wertesystem der jeweiligen Person.

Die quantitativen Analysen der Klimawirkungen sind nicht immer deckungsgleich mit den qualitativen Bewertungen, zum Beispiel wurde bei der quantitativen Analyse als Gegenwart der Bezugszeitraum (1971 bis 2000) und meist der untere Rand des RCP8.5-Szenarios für den optimistischen Fall verwendet; bei der qualitativen Bewertung hingegen wurde unter dem optimistischen Fall meist die jüngere Gegenwart und ein schwacher Klimawandel verstanden. Dies mindert aber nicht den Wert der Bewertungsergebnisse, sondern macht sie für zukünftiges Anpassungshandeln sogar praktikabler. Aufgrund der Heterogenität der Klimawirkungen und ethischer Fragen beim Vergleich von Schäden an Schutzgütern erfolgte die Bewertung sehr grob in Stufen und es konnte keine sektorenübergreifende quantitative Metrik genutzt werden.

Der methodische Ansatz der KWRA 2021 versucht, die unterschiedlichen Wissensbasen und Disziplinen der beteiligten Behörden zu einer homogenen Betrachtungsweise zu bündeln, indem gemeinsame Grundlagen und ein gemeinsames Verständnis geschaffen wurden. Dieses Vorgehen kann im Wesentlichen als erfolgreich bezeichnet werden, da weitgehend Einigkeit bei der Bewertung erzielt werden konnte. Trotzdem ist die Heterogenität der Grundlagen bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die Heterogenität des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“ war mitunter eine Herausforderung, ist aber insbesondere eine große Stärke des DAS-Prozesses. Durch die große Bandbreite von Expertisen wurden sektorenübergreifende Bewertungen erst möglich. In der Verknüpfung dieser Expertisen liegt der Schlüssel zur Lösung der interdisziplinären Herausforderung „Klimawandel“. Die Interdisziplinarität des Behördennetzwerkes zog einen intensiven Austausch und Wissenstransfer nach sich. Es haben sich neue Kooperationen gebildet, die gemeinsame Entwicklungen mit Blick auf die nächste KWRA vorantreiben werden.

Die KWRA 2021 fußt auf intensiven Literaturlauswertungen, Analysen von Daten und Modellergebnissen sowie zahlreichen Experteninterviews. Der Recherchezeitraum für die Analyse der Klimawirkungen verlief bis Anfang 2020. Vereinzelt wurden später erschienene relevante Fachveröffentlichungen in die Analyse aufgenommen, allerdings erfolgte danach keine weitere systematische Literaturrecherche. Die Literaturrecherche zur Anpassungskapazität erfolgte bis Ende September 2020.

Das genaue Verfahren der Methodik wird in Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“ ausführlich erläutert.

1.4 Beteiligte an der KWRA 2021

Die KWRA 2021 wurde von einem wissenschaftlichen Konsortium unter Federführung von adelphi in enger Kooperation mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ durchgeführt. Das wissenschaftliche Konsortium bestand aus dem Beratungs- und Forschungsinstitut adelphi, dem Planungs-, Beratungs- und Forschungsinstitut Bosch & Partner und der Eurac Research.

Das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ basiert auf dem „Netzwerk Vulnerabilität“, welches zur Erstellung der VA 2015 gegründet wurde. Es ist das umfangreichste regelmäßige Austauschforum von Bundesoberbehörden in Deutschland.

Das Behördennetzwerk war eng in die Entstehung des KWRA 2021 eingebunden. Der Austausch zwischen dem Behördennetzwerk und dem wissenschaftlichen Konsortium umfasste regelmäßige Netzwerktreffen, gemeinsame Workshops, Interviews sowie bi- und multilaterale Konsultationen. Die Netzwerkpartner haben die gewählte Methodik mitbestimmt, Fachexpertise eingebracht, in einzelnen Fällen unmittelbar textlich mitgewirkt und eine Qualitätssicherung übernommen. Vor allem aber haben sie die normativen Aufgaben, also die Bewertungen der Klimarisiken und der Anpassungskapazität übernommen.

Durch die umfangreiche Einbindung konnte die gesamte vorhandene Expertise der verschiedenen wissenschaftlichen und Umsetzungsbehörden einfließen. Gleichzeitig konnte so auch gewährleistet werden, dass die Ergebnisse mit den Bundesbehörden abgestimmt sind.

Jenseits des Netzwerks wurden noch über 50 externe Expertinnen und Experten insbesondere bei der Untersuchung der einzelnen Klimawirkungen und der Anpassungskapazitäten eingebunden. Sie sind im Anhang des Berichtes aufgeführt.

1.5 Struktur des Berichtes der KWRA 2021

Der Gesamtbericht besteht aus sechs Teilberichten, einer deutschsprachigen und einer englischsprachigen Zusammenfassung sowie einem Anhang.

Teilbericht 1 fokussiert auf die Konzepte und Grundlagen der KWRA 2021 und umfasst neben einer Einleitung ein Kapitel zur Methodik, in dem das Konzept und Vorgehen der KWRA 2021 detailliert dargestellt werden. Ein drittes Kapitel beleuchtet die Klimaprojektionen, die hydrologischen Projektionen und die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland und das damit einhergehende methodische Vorgehen. Ein viertes Kapitel präsentiert die sozioökonomischen Projektionen für Deutschland bis 2045, die neben den Klimaprojektionen in die Bewertungen der Klimarisiken eingegangen sind. In einem fünften Kapitel wird schließlich auf die generische Anpassungskapazität und Beiträge der Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft eingegangen.

In den Teilberichten 2 bis 5 sind die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse, der darauf aufbauenden Risikobewertungen sowie der Einschätzungen der Anpassungskapazität für alle Handlungsfelder dargestellt. In Teilbericht 2 stehen die Klimawirkungen und -risiken in den Handlungsfeldern „Boden“, „Biologische Vielfalt“, „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ im Fokus, die zum Cluster Land zusammengefasst sind. Der Teilbericht 3 widmet sich dem Cluster Wasser. Dies umfasst die Handlungsfelder „Fischerei“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Der Teilbericht 4 behandelt das Cluster Infrastruktur, welchem die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zugeordnet sind.

Im vorliegenden Teilbericht 5 werden sowohl das Cluster Wirtschaft, mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“ sowie „Tourismwirtschaft“, als auch das Cluster Gesundheit, was lediglich das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ umfasst, näher beleuchtet.

Teilbericht 6 umfasst eine integrierte Auswertung mit Blick auf alle Teilberichte. Die integrierte Auswertung beinhaltet, nach einer kurzen Einleitung, zunächst eine Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne Anpassung, in deren Rahmen auch ein Vergleich zu den Ergebnissen der VA 2015 erfolgt. In einem dritten Kapitel werden handlungsfeldübergreifend Aussagen zu klimatischen Einflüssen, zu Sensitivitätsfaktoren, zu Gewissheiten bei der Bewertung der Klimarisiken und zu Querverbindungen zwischen Handlungsfeldern und zwischen Klimawirkungen getroffen. In einem vierten Kapitel werden räumliche Muster untersucht. Dabei wird einerseits eine Typologie von Klimaraumtypen erarbeitet und diskutiert und andererseits eine Auswertung in Form von klimatischen Hotspot-Karten unternommen. Kapitel 5 geht dann im Quervergleich auf die Klimarisiken mit Anpassung ein, sowohl mit Blick auf die Handlungsfelder als auch mit Blick auf die Klimawirkungen. Kapitel 6 widmet sich den Handlungserfordernissen und stellt eine Priorisierung sowie eine Charakterisierung der Handlungserfordernisse vor. Kapitel 7 analysiert verschiedene Systembereiche und geht auf ihre Bezüge und sich ergebende Schlussfolgerungen für die Anpassung näher ein. Kapitel 8 betrachtet überblicksartig weiteren Forschungsbedarf zum einen aus methodischer Perspektive und zum anderen aus inhaltlicher, differenziert für die einzelnen Handlungsfelder. Kapitel 9 umfasst eine Schlussbetrachtung mit Blick auf künftige Klimarisikoanalysen.

Der Anhang der KWRA 2021 enthält unter anderem Daten und Indikatorenkennblätter mit vertiefenden Informationen zur durchgeführten Klimawirkungs- und Risikoanalyse.

Die Kapitel des vorliegenden Teilberichts folgen jeweils der gleichen Struktur. Zuerst werden für jedes Handlungsfeld die bestehenden und zukünftigen Klimawirkungen beleuchtet. Dies bietet einen ersten Überblick über die relevanten Entwicklungen im Handlungsfeld. Danach werden für bestimmte Klimawirkungen Anpassungsoptionen diskutiert und mögliche Herausforderungen aufgezeigt. In jedem Handlungsfeld werden zudem die Bewertungsergebnisse der Klimarisiken ohne Anpassung und die Einschätzung der Anpassungskapazität dargestellt. Alle Ergebnisse des Handlungsfelds werden schließlich tabellarisch zusammengefasst.

Querverweise von dem vorliegenden Teilbericht auf andere Teilberichte der KWRA 2021 sind durch die Nummer des entsprechenden Teilberichts und den Titel des relevanten Kapitels gekennzeichnet.

2 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe

Autoren: Maïke Voß, Manuel Linsenmeier, Luise Porst, Walter Kahlenborn, Lukas Dorsch | adelphi, Berlin

2.1 Ausgangslage

2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Die deutsche Wirtschaft ist in den letzten zehn Jahren stetig gewachsen. Deutschland profitiert von einer starken Industrie, welche für einen hohen Anteil der Bruttowertschöpfung verantwortlich ist (BMW 2019e). Zudem ist Deutschland als Exportnation stark in internationale Wertschöpfungsketten eingebunden. Unter Industrie werden dabei alle Wirtschaftszweige verstanden, die den Abbau, die Bearbeitung und die Weiterverarbeitung von Rohstoffen und Zwischenprodukten beinhalten. Gewerbe bezeichnet jede dauerhafte, selbstständige Tätigkeit, die auf eine Gewinnerzielung ausgelegt ist (GewO 2019). Der Anteil des verarbeitenden Gewerbes an der Bruttowertschöpfung lag im Jahr 2017 mit 23 Prozent über dem EU-Durchschnitt (BMW 2018a; Heymann 2019). Das verarbeitende Gewerbe trägt zudem einen wichtigen Teil zur Forschung und Entwicklung im Bereich neuer Technologien bei.

Beispiele für starke Sektoren der deutschen Wirtschaft sind unter anderem die Automobilindustrie, der Maschinen- und Anlagenbau, die Chemieindustrie, die Stahl-, Kupfer- und Aluminiumindustrie und die optische Industrie (BMW 2019e). Neben international agierenden Großunternehmen profitiert die deutsche Wirtschaft von einem starken Mittelstand. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) erwirtschafteten 35,5 Prozent vom gesamten Umsatz der Unternehmen in Deutschland in 2018 (BMW 2019g).

Das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ ist auf vielfältige Weise von den Folgen des Klimawandels betroffen. Für Unternehmen in Deutschland bringt der Klimawandel sowohl durch seine Folgen im Inland als auch durch Auswirkungen im Ausland Risiken mit sich. Die wirtschaftlichen Folgen von Extremwetterereignissen haben weitreichende Auswirkungen auf die deutsche Wirtschaft. Im Zeitraum von 1980 bis 2013 führten extreme Wetterereignisse kumuliert zu einer Verringerung des deutschen Bruttoinlandsproduktes (BIP) um 0,11 Prozent (EEA 2017a). Projektionen zeigen eine mögliche jährliche Reduktion des Bruttoinlandsproduktes aufgrund von Schäden durch den Klimawandel von bis zu 0,6 Prozentpunkten bis 2050 und bis zu 0,75 Prozentpunkten bis 2080 auf (Hirschfeld et al. 2015).

Die Folgen des Klimawandels im Ausland werden für Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern aufgrund des hohen Anteils an Importen und Exporten an der Wertschöpfung als besonders relevant angesehen (Benzie et al. 2016). Diese Relevanz nimmt durch eine zunehmende Internationalisierung von Beschaffungs- und Absatzmärkten, auch bei kleinen und mittleren Unternehmen, weiter zu (Lühr et al. 2014). So wurden im Jahr 2017 Waren und Dienstleistungen im Wert von insgesamt 1,54 Billionen Euro ins Ausland exportiert und im Wert von 1,29 Billionen Euro aus dem Ausland nach Deutschland importiert (47,3 beziehungsweise 39,6 Prozent des Bruttoinlandsproduktes). Damit war Deutschland im Jahr 2017 hinsichtlich seines Offenheitsgrads (Importe plus Exporte in Relation zum Bruttoinlandsprodukt) die offenste Volkswirtschaft der G7-Staaten (BMW 2018b). Die wichtigsten Handelspartner Deutschlands sind die Länder der EU, die USA sowie die Volksrepublik China.

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ existieren zahlreiche Verbindungen mit Klimawirkungen aus anderen Handlungsfeldern. So bestehen Bezüge zu den Handlungsfeldern „Energie-

wirtschaft“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Bauwesen“. Je nach Wirtschaftssektor können weitere Bezüge zu anderen Handlungsfeldern hergestellt werden.

2.1.2 Neuere Entwicklungen

Das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ ist durch eine stetige Weiterentwicklung geprägt. In den letzten Jahrzehnten haben unter anderem die Folgen der Globalisierung und der Digitalisierung die deutsche Industrie und das Gewerbe verändert (Kowalewski und Stiller 2009; Spath 2013; Lühr et al. 2014; UBA 2015).

Die Themen Digitalisierung und Industrie 4.0 werden auch in Zukunft Unternehmensprozesse beeinflussen und verändern (Henzelmann et al. 2018). Industrie 4.0 ist der Begriff für die vierte industrielle Revolution, in welcher digitale Technologien flächendeckend für Abläufe und Prozesse in Unternehmen eingesetzt werden (BMW 2019a). Diese Entwicklungen führen zu Veränderungen in den Wertschöpfungsketten, die wiederum von den Folgen des Klimawandels beeinflusst werden. So sind Lieferkonzepte wie „just-in-time“ oder die Auslagerung von Warenlagern in Zukunft verstärkten Risiken durch Beeinträchtigungen der Lieferketten aufgrund von extremen Wetterereignissen ausgesetzt (Gebauer et al. 2011; Lühr et al. 2011b).

Auch die globale Vernetzung und Ausweitung von Lieferketten und Unternehmensstrukturen wird zukünftig weiter zunehmen. Neue Organisationskonzepte wie agile Strukturen und kooperative Prozesse erweitern die Unternehmenslandschaft (Camarinha-Matos 2007; Henzelmann et al. 2018). Dies geht mit dem Wandel von Arbeitskonzepten einher (BMBF 2016). Diese Aspekte können Chancen für Unternehmen aufzeigen, um flexibler auf mögliche Folgen des Klimawandels zu reagieren. Die Zunahme von klimawandelbedingten Schäden und Investitionen in klimafreundliche Technologien zur Umsetzung internationaler Klimaschutzabkommen führt zu einer steigenden Nachfrage nach Klimaschutz- und Klimaanpassungstechnologien (DIHK Service GmbH und BMU 2019). Diese Entwicklung kann speziell für die deutsche Umwelttechnologiebranche Chancen auf nationalen und internationalen Absatzmärkten eröffnen (Bundesregierung 2008). Der Monitoringbericht zeigt für das Handlungsfeld sowohl Risiken als auch Chancen auf und weist auf die Heterogenität von Unternehmen hin, welche eine Konkretisierung zukünftiger Trends erschwert (UBA 2015; UBA 2019b).

2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Klimatische Einflüsse können Auswirkungen auf verschiedene Bereiche der industriellen und gewerblichen Wertschöpfungskette haben. So wird die Eingangslogistik von der Verfügbarkeit von Rohstoffen und Zwischenprodukten und den Bedingungen des Warentransports beeinflusst (Auerswald und Lehmann 2011). In der Produktion können durch klimatische Einflüsse Leistungseinbußen von Beschäftigten auftreten und die Verfügbarkeit produktionsbedingter Ressourcen wie Energie und Wasser beeinflusst werden (Lühr et al. 2011b). Auch der Verkauf und Absatz ins Ausland kann durch die Folgen des Klimawandels beeinträchtigt werden (Benzie et al. 2017a; Peter et al. 2019a). Zu den Folgen des Klimawandels im Ausland, deren Bedeutung für Unternehmen in Deutschland als besonders hoch eingeschätzt werden, gehören, neben Schäden an Produktionsanlagen und Infrastrukturen auf Grund von extremen Wetterereignissen, mögliche Einschränkungen des internationalen Schiffsverkehrs sowie Auswirkungen des Klimawandels auf Importe (Benzie et al. 2016; Peter et al. 2019b). Verzögert sich beispielsweise der Import von Gütern, kann dies bei dadurch entstehenden Produktionseinschränkungen auch Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen haben. Auch bei zukünftigen internationalen Standortentscheidungen können die Folgen des Klimawandels für deutsche Unter-

nehmen von zunehmender Relevanz sein (Bundesregierung 2008). Neben den genannten Risiken bieten die Folgen des Klimawandels auch Chancen für zukünftige Absatzmärkte und innovative Produkte (Bundesregierung 2008; Blazejczak et al. 2019).

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ wurden zwölf Klimawirkungen untersucht. Zwei Klimawirkungen wurden aufgrund ihrer hohen Relevanz intensiv behandelt: „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“ und „Bedingungen auf Absatzmärkten“. In dem Handlungsfeld werden somit nicht nur die direkten, sondern auch die indirekten Folgen klimatischer Einflüsse in Deutschland betrachtet. Zwangsläufig können aufgrund der Vielfalt der deutschen Unternehmenslandschaft nicht alle spezifischen Auswirkungen aufgezeigt werden. Sofern möglich, werden im Rahmen der intensiven Bearbeitung Wirtschaftszweige und Produktgruppen individuell betrachtet, um ein spezifischeres Bild der Klimawirkung darzustellen.

Tabelle 1: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	Intensive Bearbeitung
Bedingungen auf Absatzmärkten (international)	Intensive Bearbeitung
Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien	Extensive Bearbeitung
Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs	Extensive Bearbeitung
Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	Extensive Bearbeitung
Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs (Inland)	Extensive Bearbeitung
Energieverbrauch und Beeinträchtigungen bei der Energieversorgung	Extensive Bearbeitung
Wasserbedarf	Extensive Bearbeitung
Freisetzung gefährlicher Stoffe	Extensive Bearbeitung
Leistungseinbußen von Beschäftigten	Extensive Bearbeitung
Beeinträchtigung von Produktionsprozessen	Extensive Bearbeitung
Aufwand für die betriebliche Planung	Extensive Bearbeitung
Fehlende Wasserversorgung	Nicht ausgewählt
Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur	Nicht ausgewählt
Beeinträchtigung der Anwesenheit von Beschäftigten	Nicht ausgewählt
Kapitalbeschaffung am Finanzmarkt	Nicht ausgewählt
Notwendigkeit klimabedingter Investitionen	Nicht ausgewählt
Unternehmensreputation	Nicht ausgewählt

2.2 Klimawirkungen im Detail

2.2.1 Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)

Hintergrund und Stand der Forschung

Die deutsche Wirtschaft ist stark in internationale Wertschöpfungsketten eingebunden. Als Industrienation ist Deutschland zugleich auf eine verlässliche Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten für die Weiterverarbeitung angewiesen. Bei Rohstoffen handelt es sich um Materie, die außer der Extraktion aus ihrer natürlichen Umwelt keiner Weiterverarbeitung unterzogen wurde (Schoer et al. 2012). Dabei wird häufig zwischen fossilen Energieträgern, Metallerzen, nicht-metallischen Mineralien und Biomasse unterschieden (Schoer et al. 2012). Während manche Rohstoffe, die in Deutschland weiterverarbeitet werden, weitgehend im Inland abgebaut werden, zum Beispiel Steine und Erden, erfolgt die Versorgung mit anderen Rohstoffen, zum Beispiel Metallen, Industriemineralen und Energierohstoffen, teils ausschließlich über Importe. Insgesamt wurden im Jahr 2017 Rohstoffe im Wert von 162 Milliarden Euro nach Deutschland importiert (Andrulleit et al. 2017). Darüber hinaus können Rohstoffe auch indirekt über höher verarbeitete Zwischen- und Endprodukte importiert werden (UBA 2018).

Neben den direkten Importen von Rohstoffen ist das verarbeitende Gewerbe in Deutschland auch auf Importe von Zwischenprodukten angewiesen (Bastian et al. 2019). Im Folgenden wird eine Perspektive auf Importe nach Deutschland eingenommen, bei der zusätzlich zu den gering oder unverarbeiteten Rohstoffen auch Zwischenprodukte betrachtet werden. Die Abgrenzung ist in Tabelle 2 mit Beispielen für Rohstoffe, Zwischenprodukte und Endprodukte veranschaulicht.

Tabelle 2: Beispiele für Rohstoffe, Zwischenprodukte und Endprodukte

Rohstoffgruppen/ Verarbeitungsstatus	Rohstoffe	Zwischenprodukte	Endprodukte
Fossile Energieträger	Kohle, Gas, Koks	Plastik, Chemikalien, raffiniertes Erdöl	Plastikprodukte, Treibstoffe
Metallerze	Erze und Erzkonzentrate von Eisen, Nickel, Zink	Stahl, Metallbarren	Maschinen, Fahrzeuge, Waffen
Nicht-metallische Mineralien	Sand, Salz, Granit, Steine	Zement, Kies, Ziegelsteine, Glas	Gebäude, Bauwerke, technische Infrastrukturen
Biomasse	Getreide, Früchte, Gemüse, Tiere, Holz	Papier, Stoffe, Leder	Kleidung, Nahrungsmittel, Möbel

Quelle: Eigene Darstellung nach Bastian et al. 2019.

Wirkt sich der Klimawandel im Ausland auf den Abbau, die Weiterverarbeitung oder den Transport von Rohstoffen und Zwischenprodukten aus, kann dies für Unternehmen in Deutschland steigende Kosten und wirtschaftliche Risiken bedeuten (Lühr et al. 2014; Peter et al. 2019a). Etwa sechs Prozent der deutschen Importe im Jahr 2015 stammten aus als besonders klimavulnerabel eingestuften Ländern (Peter et al. 2019b). Dies kann speziell bei Rohstoffen mit ausschließlichem Vorkommen in diesen Ländern zu Importrisiken für deutsche Unternehmen führen (Henckens et al. 2016).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Unternehmen in Deutschland wurden in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ImpactCHAIN

wurde unter anderem die Außenhandelsstatistik Deutschlands ausgewertet, um Länder zu identifizieren, die besonders vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels und deren Exporte für Deutschland zugleich von wirtschaftlicher Bedeutung sind. Demnach gehören Brasilien, Vietnam, Indien, Südafrika und Thailand zu den hochvulnerablen Ländern, die hohe Exporte nach Deutschland tätigen (Peter et al. 2019a). Die Importe aus diesen Ländern betreffen unterschiedliche Warengruppen, deren Anteil an den Gesamtimporten der jeweiligen Waren nach Deutschland je nach Herkunftsland variiert. Unter den Warengruppen mit dem größten Anteil befinden sich landwirtschaftliche Produkte, Erze sowie Nahrungs- und Futtermittel (Brasilien), Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse (Vietnam und Thailand) und Zulieferungen für die deutsche Fahrzeug- und Maschinenindustrie (Südafrika) (Peter et al. 2019a).

Das Forschungsvorhaben KlimRes hat die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bergbau und auf die Rohstoffversorgung exemplarisch für neun Rohstoffe betrachtet. Dabei wurde die zukünftige Vulnerabilität des Abbaus von ausgewählten Rohstoffen durch Fallstudien in vier klimatischen Regionen untersucht. Bei der Auswahl der neun Rohstoffe wurde unter anderem ihre Bedeutung für die deutsche Wirtschaft berücksichtigt. Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen, dass vor allem extreme Wetterereignisse wie Überschwemmungen und Wirbelstürme Risiken für die Rohstoffgewinnung darstellen. Um zusätzlich eine globale Perspektive auf die Rohstoffversorgung einzubeziehen, wurde in einer separaten Analyse die Vulnerabilität der Produktionsländer (Länderabdeckung jeweils mindestens 75 Prozent der weltweiten Produktion pro Rohstoff) anhand des ND-GAIN Index² bewertet. Die Analyse hat ergeben, dass sich wichtige Produktionsstandorte von Zinn, Bauxit, Kupfer und Eisenerz in hochvulnerablen Ländern befinden (Rüttinger et al. 2020b).

Das Forschungsprojekt CLIC entwickelt Methoden zur ökonomischen Bewertung der indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf wirtschaftliche Aktivitäten in Deutschland und untersucht transnationale Klimawirkungsketten anhand ausgewählter Fallstudien (Kaiser et al. 2019).

Grundlage der Operationalisierung

Für die Untersuchung der Klimawirkung wurden Handelsstatistiken zu Importen von Rohstoffen und Zwischenprodukten nach Deutschland mit Indizes für die Vulnerabilität der exportierenden Länder verknüpft. So konnten besonders vulnerable Rohstoffe und Zwischenprodukte mit hohem Importanteil ermittelt werden. Die Analyse wurde vertieft für den ND-GAIN Index durchgeführt, es wurden aber auch Ergebnisse mit dem globalen Klima-Risiko-Index (KRI) erarbeitet und vergleichend analysiert. Der KRI analysiert, wie stark Länder und Regionen von extremen Wetterereignissen betroffen sind (Eckstein et al. 2018).

Für die vorliegende Analyse wurden alle nach Deutschland importierten Produkte als Endprodukte oder Nicht-Endprodukte klassifiziert. Hierfür wurden die Broad Economic Categories (BEC) der Vereinten Nationen verwendet (Vereinte Nationen 2018). In einem zweiten Schritt wurden alle Nicht-Endprodukte danach unterschieden, ob sie bereits weiterverarbeitet wurden oder noch nicht, und entsprechend als Zwischenprodukte oder als Rohstoffe im engeren Sinne klassifiziert. Auch diese Information wurde den Datensätzen der Vereinten Nationen entnommen (Vereinte Nationen 2018). Die Rohstoffe und Zwischenprodukte wurden anhand des HS-Codes nach dem „Harmonized Commodity Description and Coding System“ kategorisiert, einem standardisierten System zur Klassifizierung von Handelsprodukten (WCO 2018).

² Der ND-GAIN Index misst die Vulnerabilität eines Landes gegenüber dem Klimawandel. Zudem beurteilt der Index die Bereitschaft eines Landes, Investitionen für private und öffentliche Anpassungsmaßnahmen wirksam einzusetzen (Chen et al. 2015; Peter et al. 2019a).

Für alle Rohstoffe und Zwischenprodukte wurde anschließend die Vulnerabilität der Zuliefererländer ausgewertet. Hierfür wurde für jedes Produkt eine gewichtete mittlere Vulnerabilität anhand der Importanteile pro Zuliefererland berechnet. Außerdem wurden alle Zuliefererländer gemäß ihrer Vulnerabilität in Quartile eingeteilt und es wurde für jedes Produkt berechnet, welcher Anteil der jeweiligen Importe im Jahr 2017 auf welches Quartil entfiel. In einem weiteren Schritt wurde für jedes Produkt, basierend auf den jeweiligen Anteilen der verschiedenen Zuliefererländer am Gesamtimport dieses Produktes nach Deutschlands, ein Maß für die Konzentration der Importe berechnet, der sogenannte Herfindahl-Hirschman-Index (Rhoades 1993). Tabelle 3 fasst die genannten Faktoren und Indikatoren zusammen.

Tabelle 3: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Vulnerabilität in Zuliefererländern	- Mit Importvolumen gewichteter Mittelwert des ND-GAIN Index für jedes Produkt	IG-KL-01
	- Mit Importvolumen gewichteter Mittelwert des Klimarisiko-Index (KRI) für jedes Produkt	IG-KL-02
Wirtschaftliche Bedeutung eines Produkts	Importvolumen in US-Dollar	IG-SO-03
Konzentration der Zulieferungen	Herfindahl-Hirschmann-Index für Marktkonzentration der Importe	IG-SO-04

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

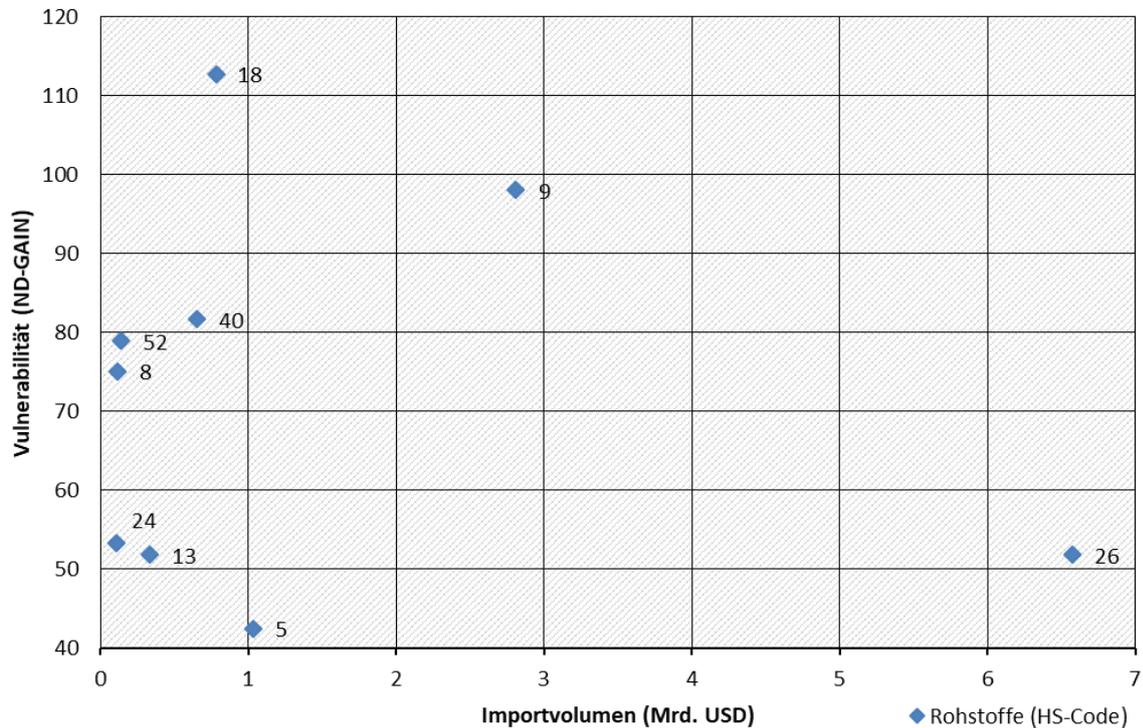
Da innerhalb des ND-GAIN Index Indikatoren der Anpassungskapazität verrechnet werden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Ergebnisse der Operationalisierung indirekt die Anpassungskapazität der benannten Länder berücksichtigen (Chen et al. 2015).

In den folgenden Abschnitten werden zuerst der Import von Rohstoffen und danach der Import von Zwischenprodukten nach ihrer Vulnerabilität im Vergleich zum Importvolumen beschrieben. Anschließend werden zukünftige Trends der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten dargestellt.

Ergebnisse Rohstoffe

Abbildung 1 betrachtet das Importvolumen und die gewichtete Vulnerabilität von Rohstoffen (Darstellung der jeweiligen HS-Codes) mit einem Importvolumen von mindestens 0,1 Milliarden US-Dollar und einem Vulnerabilitätswert über 40. Der Vulnerabilitätswert berechnet sich aus dem gewichteten Mittelwert des ND-GAIN-Rankings der einzelnen Importländer für den jeweiligen Rohstoff. Rohstoffe mit einem höheren Wert weisen somit eine höhere Vulnerabilität auf. Die Vulnerabilitätsskala ähnelt den Grenzwerten des ND-GAIN-Rankings (1 bis 181), wobei die Ergebnisse für Rohstoffe mit einem Importvolumen von mindestens 0,1 Milliarden US-Dollar den Wert 113 nicht überschreiten.

Abbildung 1: Importvolumen und gewichtete Vulnerabilität für ausgewählte Rohstoffe (Darstellung in HS-Codes)



Quelle: Eigene Darstellung, adelphi.

Einen hohen Vulnerabilitätswert weisen Rohstoffe wie Kakao [18], Kaffee, Tee, Mate und Gewürze [9], Kautschuk und Waren daraus [40] sowie Baumwolle [52] auf (Abbildung 1).³

Die Vulnerabilität des Importes von Erzen sowie Schlacken und Aschen [26] deckt sich mit aktuellen Projektionen der Europäischen Umweltagentur (EEA 2017a). Auffallend ist das hohe Importvolumen, welches bei auftretenden Lieferschwierigkeiten zu hohen Ausfallrisiken führen kann. Tabelle 4 zeigt eine Auswahl der hochvulnerablen Produktgruppen mit Nennung der wichtigsten Importländer.

Tabelle 4: Auswahl der hochvulnerablen Produktgruppen und spezifizierte Produkte mit Importländern absteigend nach Vulnerabilitätswert

HS-Code	Beschreibung	Spezifizierte Produkte (Anteil am Handelsvolumen des Rohstoffes)	Vulnerabilität (ND-GAIN) (hoch=vulnerabel)	Importiert aus	Konzentration (hohe Konzentration = 1)
18	Kakao und Zubereitungen aus Kakao	Kakaobohnen, ganz/gebrochen, roh/geröstet (99,75%)	112,97	Elfenbeinküste (51,9%), Nigeria (15,6%), Ghana (10,7%)	0,27
9	Kaffee, Tee, Mate und Gewürze	Kaffee, nicht geröstet, nicht entkoffeiniert (99,75%)	98,14	Brasilien (30,1%), Vietnam (18,3%), Honduras (10,7%)	0,16

³ Die weiteren HS-Codes in der Abbildung stehen für: Genießbare Früchte und Nüsse; Schalen von Zitrusfrüchten oder von Melonen [8], Tabak und Verarbeitete Tabakersatzstoffe [24], Schellack; Gummi, Harze und andere Pflanzensäfte und Pflanzenauszüge [13] und andere Waren tierischen Ursprungs, anderweit weder genannt noch inbegriffen [5]. Eine vollständige Auflistung der detaillierten Ergebnisse findet sich im Anhang der KWRA 2021.

HS-Code	Beschreibung	Spezifizierte Produkte (Anteil am Handelsvolumen des Rohstoffes)	Vulnerabilität (ND-GAIN) (hoch=vulnerabel)	Importiert aus	Konzentration (hohe Konzentration = 1)
40	Kautschuk und Waren daraus	Technisch spezifizierter Naturkautschuk (76,93%)	91,60	Elfenbeinküste (23,9%), Indonesien (20,4%), Malaysia (19%)	0,18
26	Erze sowie Schlacken und Aschen	Aluminiumerze & Konzentrate (1,58%)	127,40	Guinea (74,7%), China (13,5%), Guyana (3,9%)	0,52
		Kupfererze & Konzentrate (34,27%)	51,99	Peru (24,1%), Chile (19,4%), Brasilien (15,9%)	0,16
		Eisenerze & Konzentrate, agglomeriert (16,40%)	45,68	Brasilien (32,2%), Kanada (24,8%), Schweden (23,6%)	0,18
52	Baumwolle	Baumwollabfälle mit Ausnahme von Garnabfällen (48,87%)	87,95	Indien (51,1%), Türkei (34%), Pakistan (3,6%)	0,31

Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben CLIC bestätigen die hohe Vulnerabilität des Rohstoffes Kakaos (Tirana et al. 2021). 70 Prozent des weltweit gehandelten Kakaovolumens wird aus Westafrika (Elfenbeinküste, Nigeria, Ghana) exportiert, da dort die spezifischen klimatischen Bedingungen für die Kakaoproduktion erfüllt werden (Hütz-Adams 2012; Schroth et al. 2016). Jedoch erleben die Länder dieser Region eine steigende Instabilität durch extreme Klima- und Wetterereignisse. 1982 und 1983 führten Dürren zu einem Produktionsrückgang von 23 Prozent an der Elfenbeinküste im Vergleich zur Ernte des Vorjahres (Ruf et al. 2015). Klimaprojektionen zur zukünftigen Entwicklung des Kakaoanbaus zeigen starke Veränderungen aufgrund von höheren Durchschnitts- und Extremtemperaturen und Veränderungen der Wasserverfügbarkeit (Schroth et al. 2016). In vielen Anbauregionen Westafrikas (besonders der Elfenbeinküste und Nigeria) wird die Güte der Anbaubedingungen bis 2050 wahrscheinlich sinken (Schroth et al. 2016). Dies kann zu Schwankungen im zukünftigen Import von Kakao führen. Gleichzeitig wird ein Anstieg in der Nachfrage nach nachhaltigem Kakao und nachhaltigen Kakao-Produkten in Deutschland erwartet. Projektionen über die zukünftige Verfügbarkeit von Kakao können durch den Einfluss anderer wirtschaftlicher, sozialer und politischer Faktoren jedoch schwer getroffen werden und unterliegen hohen Unsicherheiten.

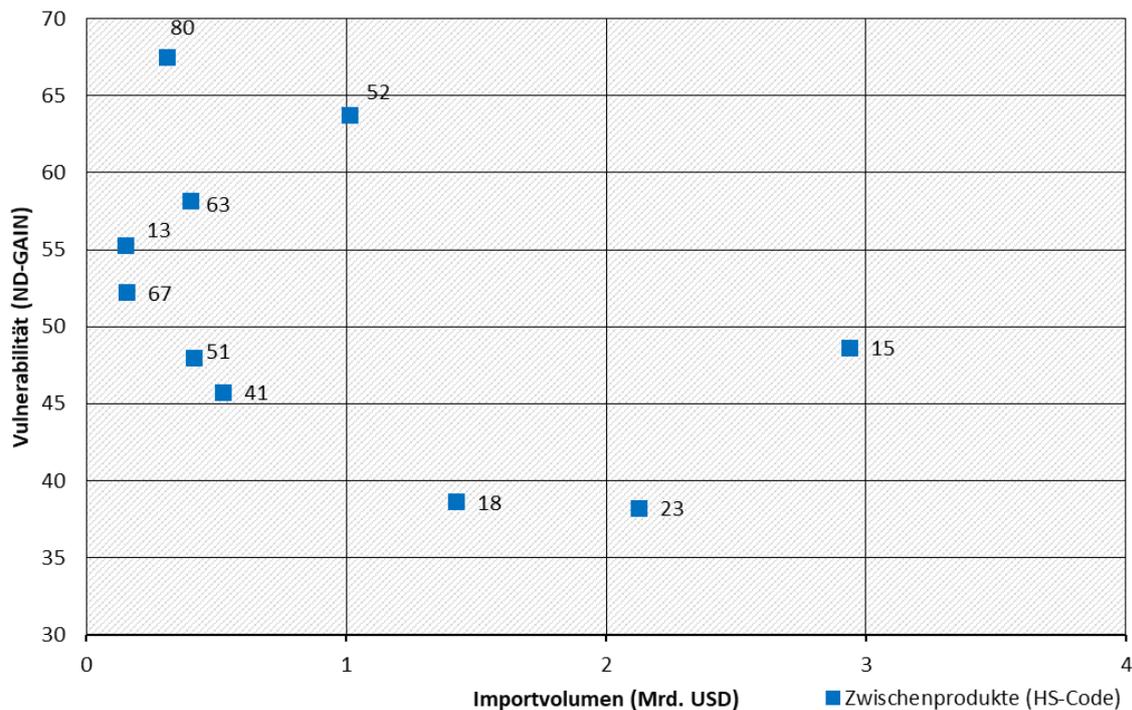
Ergebnisse Zwischenprodukte

Betrachtet man die importierten Zwischenprodukte ab einem Vulnerabilitätswert von 38 und einem Importvolumen von mindestens 0,1 Milliarden US-Dollar, so weisen Zinn und Waren aus Zinn [80], Baumwolle [52] sowie andere konfektionierte Spinnstoffwaren [63] eine hohe Vulnerabilität auf (Abbildung 2).⁴ Der Vulnerabilitätswert bezieht sich wieder auf den gewichteten Mittelwert des ND-GAIN-Rankings der Herkunftsländer. Der Grenzwert der Vulnerabilität der

⁴ Die weiteren HS-Codes in der Abbildung stehen für: Schellack; Gummi, Harze und andere Pflanzensäfte und Pflanzenauszüge [13], Zugerichtete Federn und Daunen und Waren aus Federn oder Daunen; Künstliche Blumen; Waren aus Menschenhaaren [67], Tierische und pflanzliche Fette und Öle; Erzeugnisse ihrer Spaltung; Genießbare verarbeitete Fette; Wachse Tierischen und pflanzlichen Ursprungs [15], Wolle, Feine und grobe Tierhaare; Garne und Gewebe aus Rosshaar [51], Häute, Felle (andere als Pelzfelle) und Leder [41], Kakao und Zubereitungen aus Kakao [18], Rückstände und Abfälle der Lebensmittelindustrie; Zubereitetes Futter [23]. Eine vollständige Auflistung der detaillierten Ergebnisse findet sich im Anhang der KWRA 2021.

betrachteten Zwischenprodukte mit einem Importvolumen von mindestens 0,1 Milliarden US-Dollar liegt dabei bei 67,55. Zinn wird hierbei als Zwischenprodukt behandelt, da zur Gewinnung das abgebaute Zinnerz direkt zu Zinn geschmolzen wird. Unverarbeitetes Zinn bezieht sich somit auf das bereits geschmolzene Zwischenprodukt, welches noch nicht weiterverarbeitet wurde. Die hohe Vulnerabilität von Ländern, in denen Zinn abgebaut wird, wurde auch im KlimRes Vorhaben bestätigt (Rüttinger et al. 2020b).

Abbildung 2: Importvolumen und gewichtete Vulnerabilität für ausgewählte Zwischenprodukte (Darstellung in HS-Codes)



Quelle: Eigene Darstellung, adelphi.

Tabelle 5 zeigt ausgewählte Zwischenprodukte mit Nennung der wichtigsten Importländer. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Abbau von Zinn wurden durch das KlimRes Vorhaben in einem Fallbeispiel untersucht (UBA 2020). Für deutsche Unternehmen ist Indonesien ein wichtiger Handelspartner, da 24,7 Prozent des importierten Zinns von dort bezogen werden (Tabelle 5). Die hohe Vulnerabilität Indonesiens gegenüber extremen Wetterereignissen wie Starkregen oder Wirbelstürmen stellt ein hohes Risiko für den zukünftigen Abbau von Zinn dar. 2016 musste ein indonesisches Bergwerk zeitweise aufgrund von starken Überschwemmungen geschlossen werden. Außerdem war der Zugang zu Bergwerken und Zinnschmelzen während der Überschwemmungen eingeschränkt und es kam zu Unterbrechungen bei der Elektrizitätsversorgung. Klimaprojektionen gehen von einer steigenden Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen durch Starkregen in den Hauptabbaugebieten in Indonesien aus (Rüttinger et al. 2020a). Es besteht somit die Möglichkeit, dass der Import von Zinn aus Indonesien durch deutsche Unternehmen in Zukunft höheren Risiken ausgesetzt sein wird.

Tabelle 5: Auswahl der hochvulnerablen Produktgruppen mit Importländern absteigend nach Vulnerabilitätswert

HS-Code	Beschreibung	Spezifizierte Produkte (Anteil am Handelsvolumen des Zwischenprodukts)	Vulnerabilität (ND-GAIN) (hoch=vulnerabel)	Importiert aus...	Konzentration (hohe Konzentration = 1)
80	Zinn und Waren daraus	Zinn, nicht legiert, unverarbeitet (87,37%)	72,97	Indonesien (24,7%), Belgien (17,6%), Peru (11,6%)	0,26
52	Baumwolle	Baumwollgewebe, das 85% Baumwolle enthält (0,022%)	124,92	Pakistan (78,5%), Österreich (7,8%), Frankreich (6,1%)	0,76
		Baumwollgarn, einzeln (ohne Nähgarn), aus gekämmten Fasern, mit einem Gehalt an Baumwolle von 85% (4,53%)	71,15	Indien (40,5%), Österreich (19,4%), China (17,8%)	0,22
63	Andere konfektionierte Spinnstoffwaren; Warenzusammenstellungen; Altwaren und Lumpen	Säcke und Beutel, von der für die Verpackung von Waren verwendeten Art, aus Jute (1,40%)	95,24	Indien (35,7%), Bangladesch (23%), Polen (18,4%)	0,27
		Schüttgutbehälter, flexibel, zu Verpackungszwecken, aus synthetischen oder künstlichen Spinnstoffen (51,21%)	69,83	Indien (34,8%), Türkei (31,2%), Rumänien (6,8%)	0,20
13	Schellack; Gummi, Harze und andere Pflanzensäfte und Pflanzenauszüge	Schleimstoffe & Verdickungsmittel, gewonnen aus Bohnen/Samen (43,50%)	73,93	Indien (42,7%), Schweiz (14,8%), Italien (12,3%)	0,26
		Schleimstoffe und Verdickungsmittel, auch/ohne Modifikation, aus pflanzlichen Produkten gewonnen (43,72%)	37,70	China (23,9%), Frankreich (23%), Dänemark (12,2%)	0,16
15	Tierische und pflanzliche Fette und Öle; Erzeugnisse ihrer Spaltung; genießbare verarbeitete Fette [...]	Kokosnussöl (Kopra), roh (0,043%)	94,51	Indonesien (59%), Philippinen (22,7%), Sri Lanka (7,8%)	0,28
		Tierische / pflanzliche Fette & Öle chemisch modifiziert (13,44%)	20,51	Niederlande (60,5%), Slowakei (13,6%), Japan (4,7%)	0,53
		Palmöl, ausgenommen Rohöl (12,95%)	32,31	Niederlande (46,2%), Italien (17,8%),	0,38

HS-Code	Beschreibung	Spezifizierte Produkte (Anteil am Handelsvolumen des Zwischenprodukts)	Vulnerabilität (ND-GAIN) (hoch=vulnerabel)	Importiert aus...	Konzentration (hohe Konzentration = 1)
				Malaysia (13,7%)	

Zukünftige Trends für die Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten

Sowohl für die zukünftige Versorgung mit Rohstoffen wie auch mit Zwischenprodukten können Risiken für deutsche Unternehmen entstehen. So können unter anderem die Auswirkungen von extremen Wetterereignissen wie Starkniederschlägen und Stürmen zu einer Verknappung von Rohstoffen und Zwischenprodukten durch Lieferengpässe oder -verzögerungen führen (Lühr et al. 2011b; Benzie et al. 2017b). Dies ist besonders bei Zulieferern in potenziell stark vom Klimawandel betroffenen Regionen der Fall, da höhere Risiken bestehen, dass Produktionsstätten und vorhandene Infrastruktur Schäden tragen können (Willner et al. 2018; Peter et al. 2019a). Werden einzelne Transportwege durch die Folgen des Klimawandels eingeschränkt, so wirkt sich dies auch negativ auf den Transport von Rohstoffen und Zwischenprodukten nach Deutschland aus und beeinflusst die zeitliche Taktung unternehmensinterner Produktionsprozesse (siehe 2.2.11). Auch Qualitätsschwankungen bei Rohstoffen und Zwischenprodukten sind aufgrund der Auswirkungen klimatischer Einflüsse in Produktionsländern nicht auszuschließen (Peter et al. 2019a).

Gleichzeitig können Nachfrage- und Angebotsschwankungen einen Anstieg der Rohstoffpreise zur Folge haben (Fichter und Stecher 2011). Hierbei sind Angebotsschwankungen und Preisanstiege auch abhängig vom Rohstoffvorkommen und der Abbaugeschwindigkeit der verfügbaren Rohstoffe, besonders bei Rohstoffen mit geringem Vorkommen und hoher Nachfrage (Henckens et al. 2016). Preisvolatilitäten werden zudem oft durch Spekulationen verursacht, was die Abgrenzung rein klimaabhängiger Preisschwankungen erschwert (Peter et al. 2019a).

Grundsätzlich sind die genannten Trends für die Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten mit großen Unsicherheiten verbunden, da neben den Auswirkungen des Klimawandels auch zahlreiche politische und wirtschaftliche Faktoren den Abbau und die Produktion in den Importländern beeinflussen (BAFU 2017; Peter et al. 2019a). Zudem liegen keine Aussagen zu Veränderungen der Länderverteilung zukünftiger Importe deutscher Unternehmen vor. Dynamische Änderungen der Länderkonzentration sind daher nicht auszuschließen. Aus diesen Gründen können keine spezifischen Aussagen zu den Entwicklungen für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts gegeben werden. Generelle Entwicklungen der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten lassen sich dennoch aus den Werten des ND-GAIN Indexes ableiten. Dieser verwendet teilweise zukunftsorientierte Indikatoren, indem er neben der Vulnerabilität auch die Bereitschaft eines Landes misst, Investitionen für zukünftige Anpassungsaktivitäten anzuziehen (Chen et al. 2015). Länder mit einer geringen Bereitschaft für solche Investitionen könnten somit zukünftig weniger angepasst für die Folgen klimatischer Einflüsse sein. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit für negative Auswirkungen auf den Export von Rohstoffen und Zwischenprodukten.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 6: „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“

- ▶ Die zukünftige Versorgung deutscher Unternehmen mit Rohstoffen und Zwischenprodukten kann insbesondere durch die Auswirkungen klimatischer Einflüsse in klimavulnerablen Ab- und Anbauländern beeinträchtigt werden.
- ▶ Dabei weisen Rohstoffe wie Kakao, Kaffee, Tee, Mate, Kautschuk und Baumwollen mit Blick auf die derzeitigen Herkunftsländer hohe Vulnerabilitäten auf. Zwischenprodukte erreichen geringere Vulnerabilitätswerte, haben jedoch im Vergleich zu Rohstoffen eine höhere Marktkonzentration. Rohstoffe und Zwischenprodukte mit hohem Importvolumen und mittlerer Vulnerabilität sind Erze, Schlacke und Aschen und tierische und pflanzliche Fette und Öle.
- ▶ Unbeachtet bleibt, dass mehrere Länder von denselben klimatischen Einflüssen gleichzeitig betroffen sein können, welches die Gesamtbeeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten auch bei niedriger Länderkonzentration erhöhen kann.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“

Folgende Sensitivitätsfaktoren lassen sich für die Klimawirkung aufführen: der Anteil der Importe der jeweiligen Unternehmen aus klimavulnerablen Ländern, der Anteil der verwendeten Rohstoffe und/oder Zwischenprodukte mit geringen Substitutionsmöglichkeiten, die Marktkonzentration der Importe, das heißt, ob diese aus vielen oder nur einzelnen Ländern bezogen werden, und die Verlässlichkeit der Verkehrswege, über die der An- beziehungsweise Abtransport von Rohstoffen und Zwischenprodukten erfolgt.

Von den genannten Faktoren kann Anpassung besonders beim Anteil der Importe aus klimavulnerablen Ländern ansetzen. Eine Verringerung der Marktkonzentration, also eine Verteilung des Imports auf viele Produzenten, ist bei Rohstoffen und Zwischenprodukten mit hohem Vorkommen in vielen Ländern möglich. Staatliches Handeln im Sinne einer Anpassung der Rahmenbedingungen kann speziell bei den ersten beiden Faktoren ansetzen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der Aktionsplan Anpassung III der Bundesregierung (APA III) sieht keine Maßnahmen oder Instrumente vor, um zur Reduktion der Beeinträchtigung der internationalen Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten beizutragen. Spezifische Maßnahmen in Bezug auf Einschränkungen im inländischen Warentransport von Rohstoffen und Zwischenprodukten werden in der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ (siehe 2.2.5) und im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ in der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ näher erläutert.

Transnationale Auswirkungen, das heißt die Bedeutung der Auswirkungen des Klimawandels in anderen Ländern für die eigene Wirtschaft, werden in der Anpassungsstrategie der Europäischen Union als Prioritätsbereich ausgewiesen (Europäische Kommission 2021). Dieser stellt jedoch ein Kommunikationsinstrument dar und bildet keine gesetzliche Grundlage für Anpassung (Benzie et al. 2017a).

Weiterreichende Anpassung

Bei den im Folgenden aufgeführten Aspekten der weiterreichenden Anpassung handelt es sich um Maßnahmen, welche vorwiegend auf Ebene des Bundes ansetzen. Grundsätzlich existieren neben den in Tabelle 7 benannten Maßnahmen diverse Anpassungsmöglichkeiten für betroffene Unternehmen im Rahmen des betrieblichen Prozessmanagements. Staatliches Handeln kann dann als angemessen betrachtet werden, wenn ohne dieses Handeln ein Marktversagen eintreten könnte. Zusätzlich kann der Bund zu einer positiven Veränderung der Rahmenbedingungen beitragen (Peter et al. 2020).

Tabelle 7: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁵	Charakteristika
Strategische Gestaltung von Handelsbeziehungen (Benzie et al. 2018)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Stärkung des Handels mit Regionen, die eine geringe Klimavulnerabilität aufweisen (Peter et al. 2020)	Bund; Europäische Union	Erfordert Bewusstseins-schaffung und verstärkte Risikowahrnehmung; Entwicklungspolitisch ggf. problematisch
Mainstreaming von Anpassungsinstrumenten zu transnationalen Klimarisiken	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Integration von Maßnahmen zur Anpassung an transnationale Klimarisiken in bestehende politische Strategien (UBA 2020)	Bund; Europäische Union	Auf Ebene der Europäischen Union beispielsweise durch eine Schwerpunktsetzung in der europäischen Anpassungsstrategie
Gestaltung von Förderinstrumenten für Unternehmen: <ul style="list-style-type: none"> - Förderung der Diversifizierung der betrieblichen Wertschöpfungsketten (Peter et al. 2020) - Förderung transparenter Lieferketten, besonders für KMU (Rüttinger und Sharma 2016; Peter et al. 2020) - Förderung sektoraler Anpassungsinitiativen 	Finanzielle Ressourcen	Schaffung von finanziellen Anreizen für Unternehmen zur Anpassung	Bund; Branchenverbände der Industrie und des Gewerbes	Wirksamkeit kann durch dynamische Monitoring- und Response-Ansätze evaluiert und angepasst werden, um flexibel auf wirtschaftliches Handeln reagieren zu können.

⁵ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁵	Charakteristika
vulnerabler Wirtschaftszweige (Peter et al. 2020)				
Standardisierung der Risikoabschätzung durch Förderung der Offenlegung von finanziellen Klimarisiken von Firmen (Peter et al. 2020)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Fortführung und Übertragung der Arbeiten der „Taskforce on Climate-Related Financial Disclosures“ (TCFD) auf nationaler Ebene; Entsprechende Stärkung der Arbeiten zur EU-Taxonomie für nachhaltige Investitionen	Europäische Union; Industrie- und Wirtschaftsverbände; Versicherungen und Banken; Unternehmen	
Förderung von Forschung und Entwicklung: - Im Bereich alternative Technologien oder Substitute - Im Bereich Recycling und Rückgewinnung von Rohstoffen (BMW 2019f; BMU 2020)	Finanzielle Ressourcen; Wissen	Substitutions- und Rückgewinnungs-Forschung, speziell von Rohstoffen mit fast ausschließlichem Vorkommen in hochvulnerablen Ländern	Bund; Forschungseinrichtungen	
Anpassungsförderung im Rahmen der Deutschen Entwicklungszusammenarbeit	Finanzielle Ressourcen	Anpassungsförderung in hochvulnerablen Ländern, welche wichtige und schwer substituierbare Zulieferermärkte für Deutschland sind (Benzie et al. 2017a; Peter et al. 2020)	Bund	

Die genannten weiterreichenden Anpassungsmaßnahmen decken insbesondere die Anpassungsdimensionen „Finanzielle Ressourcen“ und „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ ab. Für die Umsetzung der Maßnahmen ist zusätzlich die Dimension „Motivation und Akzeptanz“, das heißt die Risikowahrnehmung und die Bewusstseins-schaffung für die Problemlage, von hoher Relevanz.

Grenzen bei der Anpassung an Beeinträchtigungen der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten treten auf, wenn Zeitspannen der institutionellen und rechtlichen Anpassung die oft eher kürzeren Planungshorizonte des betriebswirtschaftlichen Managements übersteigen (Peter et al. 2020). Ein weiteres Hindernis könnte in einem geringen Bewusstsein für zukünftige transnationale Klimarisiken bestehen. Ein vermindertes Risikobewusstsein und eine damit einhergehende mangelnde Wahrnehmung der Betroffenheit mögen gegebenenfalls zu einer eingeschränkten Annahme von staatlichen Förderinstrumenten seitens der Unternehmen führen (Benzie et al. 2017a; Tenggren et al. 2020). Zudem erreicht staatliches Handeln seine Grenzen,

wenn durch mögliche Maßnahmen Marktungleichgewichte geschaffen werden oder ein Eingriff in den freien Wettbewerb erfolgt.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 8: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Finanzwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> - Versicherungslösungen wie zum Beispiel Klimaversicherungen können zur Schadensmilderung beitragen (Peter et al. 2020) - Arbeiten der „Taskforce on Climate-Related Financial Disclosures“ (TCFD) zur klimabezogenen Offenlegung von finanziellen Risiken (Peter et al. 2020; TCFD 2020) - Zukünftige Relevanz der Umsetzung der EU-Taxonomie zur Ermittlung der ökologischen Nachhaltigkeit von Investitionen und damit offenzulegenden Informationen - Investitionen von Finanzakteuren in Klimaanpassungsmaßnahmen in anderen und speziell vulnerablen Ländern
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	<ul style="list-style-type: none"> - Vorhaltung von erweiterten Lagerkapazitäten für Nahrungsmittelengpässe - Analyse der strategischen Reserven des Bundes an Rohstoffen unter Betrachtung der Folgen des Klimawandels

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken wurde durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ eine Anpassungsdauer bis zu zehn Jahren ausgewiesen. Die meisten genannten Maßnahmen auf Ebene des Bundes sind bereits in diesem Zeitraum umsetzbar. Die Anpassungsdauer in Bezug auf staatliche Förderinstrumente für Unternehmen kann stark abhängig von der individuellen Risikowahrnehmung und der damit verbundenen Dringlichkeit sein.

Tabelle 9: Zeitdauer der Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	Alle in Tabelle 7 genannten Maßnahmen/Instrumente

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Möglichkeiten der transformativen Anpassung zur Reduzierung der Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukte sind besonders auf Ebene des internationalen Politik- und Handelsgeschehen angesiedelt (Benzie und Persson 2019). So könnte eine internationale Klimaanpassungspolitik dazu beitragen, Klimaanpassung in hochvulnerablen Ländern zu fördern und somit die Auswirkungen zukünftiger Klimafolgen und damit zusammenhängende Beeinträchtigungen der Rohstoff- und Zwischenproduktversorgung zu mindern. Neben staatlichem Handeln könnten auch Initiativen von nichtstaatlichen Akteuren, wie Unternehmen, Nichtregierungs-Organisationen und Finanzinstituten handlungsweisend in der Gestaltung von Anpassungsmechanismen zur Minderung transnationaler Risiken sein (Benzie und Persson 2019). Als gegenläufige Tendenz könnte auch eine selektive Regionalisierung von vulnerablen Wert-

schöpfungsketten angestrebt werden (Peter et al. 2020). Diese würde jedoch eher als Sicherheitsnetz für zukünftige Beeinträchtigungen dienen, statt als übergreifende Deglobalisierungsstrategie.

Einschätzung der Anpassungskapazität

Tabelle 10: „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“: Wirksamkeit der Anpassung

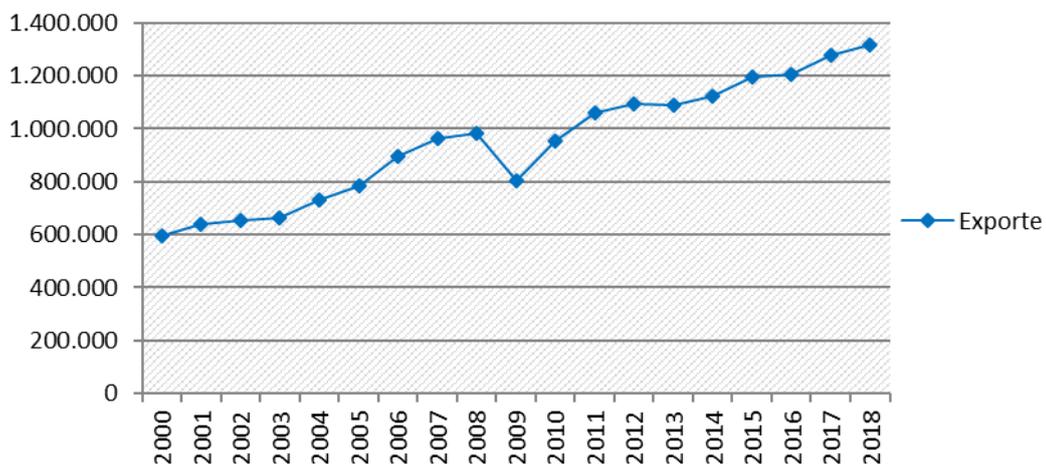
	Beschlusste Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	hoch	mittel				

2.2.2 Bedingungen auf Absatzmärkten (international)

Hintergrund und Stand der Forschung

Deutschland ist der weltweit einer der größten Exporteure von Waren und Dienstleistungen (BMWi 2018b). Im Jahr 2017 exportierten deutsche Unternehmen Waren und Dienstleistungen im Wert von insgesamt 1,54 Billionen Euro ins Ausland (47,3 Prozent des Bruttoinlandproduktes). Zu den wichtigsten exportierten Warengruppen gehörten Kraftwagen und Kraftwagenteile, Maschinen, chemische Erzeugnisse und Datenverarbeitungsgeräte sowie elektrische und optische Erzeugnisse (BMWi 2018b). Bis auf einen kurzen Einbruch in 2009 infolge der Weltwirtschaftskrise lässt sich ein positiver Trend für die Entwicklung des deutschen Außenhandels in den letzten zwei Jahrzehnten erkennen (Abbildung 3) (Destatis 2018a).

Abbildung 3: Gesamtentwicklung des deutschen Außenhandels (2000-2018)



Quelle: Eigene Darstellung nach Destatis 2018a.

Diese Exportstärke kann zu einer erhöhten Anfälligkeit Deutschlands gegenüber Klimafolgen in anderen Weltregionen führen (Benzie et al. 2016). Die Haupthandelspartner Deutschlands sind Länder der Europäischen Union (BMWi 2018b). Jedoch unterhält Deutschland auch wichtige Handelsbeziehungen mit Ländern, welche eine hohe Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels aufweisen (Peter et al. 2019b). Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ImpactCHAIN zeigen, dass sich vier Prozent (50 Milliarden Euro) der deutschen Exporte im Jahr

2015 auf zwölf als besonders klimavulnerable geltende Länder verteilt (Peter et al. 2019a). Dabei werden große Handelsvolumina nach Brasilien, Indien, Südafrika, Vietnam und Thailand exportiert (Peter et al. 2019b). Die deutsche Exportwirtschaft ist somit Risiken durch die Folgen des Klimawandels in anderen Ländern ausgesetzt. Dies betrifft vor allem Unternehmen, die einen hohen Warenanteil in die oben genannten Länder exportieren. Die klimatischen Einflüsse und Entwicklungen zeigen jedoch auch Chancen für zukünftige Absatzmärkte auf (Bardt et al. 2012).

Grundlage der Operationalisierung

Bei der Operationalisierung der Klimawirkung wurden Handelsstatistiken zu deutschen Exporten mit Indizes für die Vulnerabilität der importierenden Länder verknüpft. So konnten Wirtschaftszweige mit hohem Anteil an Exporten in besonders vulnerable Länder ermittelt werden. Die Methodik der Operationalisierung gleicht der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten“. Die Resultate beziehen sich jedoch nicht auf spezifische Produktgruppen, sondern stellen wirtschaftliche Aktivitäten heraus, welche am meisten vom Klimawandel betroffen sind. Durch Korrespondenz-Tabellen des Statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat) wurde die Vulnerabilität per Wirtschaftszweig anhand der Handelsdaten und der Indizes ND-GAIN und des Klima-Risiko-Index (KRI) der Länder berechnet (UNSD 2019). Eine vertiefende Analyse wurde für den ND-GAIN Index durchgeführt. Die Wirtschaftszweige wurden nach der ISIC Nomenklatur (englisch: International Standard Industrial Classification)⁶ kategorisiert (Vereinte Nationen 2008). Um nur wirtschaftliche Aktivitäten zu berücksichtigen, welche eine signifikante Rolle für die deutsche Exportwirtschaft spielen, wurden Aktivitäten mit einem Exportvolumen kleiner als eine Milliarde US-Dollar in der Operationalisierung nicht berücksichtigt. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung.

Die Operationalisierung erfolgt unter der Annahme, dass die Nachfrage nach Import-Produkten auf hochvulnerablen Absatzmärkten in Zukunft durch die Folgen des Klimawandels geringer sein könnte und dadurch höhere Exportrisiken für deutsche Unternehmen entstehen. Chancen, die sich durch Klimafolgen für die Exportwirtschaft ergeben, sind nicht Teil der Operationalisierung und werden separat erläutert.

Tabelle 11: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Vulnerabilität in Zuliefererländern	- Mit Exportvolumen gewichteter Mittelwert des ND-GAIN Index für jeden Wirtschaftszweig	IG-KL-05
	- Mit Exportvolumen gewichteter Mittelwert des Klima-Risiko-Index (KRI) für jeden Wirtschaftszweig	IG-KL-06
Wirtschaftliche Bedeutung eines Wirtschaftszweigs	Exportvolumen in US-Dollar	IG-SO-07
Konzentration der Exporte	Herfindahl-Hirschmann Index für Marktkonzentration der Exporte	IG-SO-08

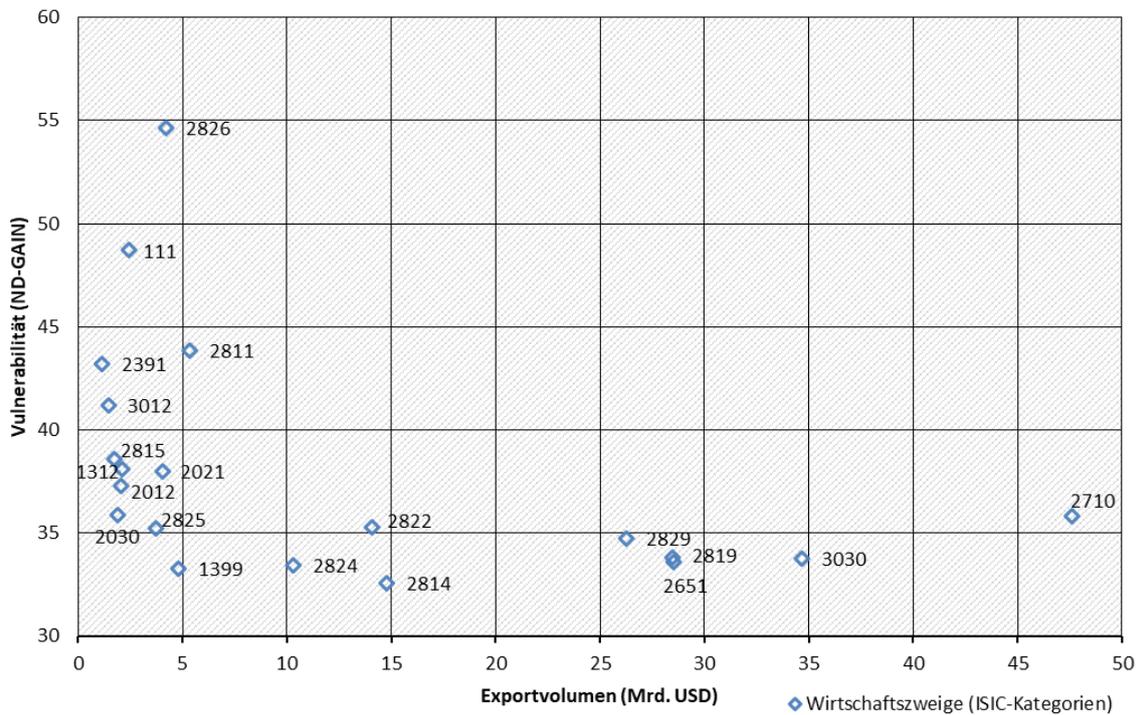
Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

⁶ Die ISIC-Nomenklatur ist eine Klassifikation der Vereinten Nationen zur Gliederung von Wirtschafts- und Industriezweigen.

Ergebnisse

Betrachtet man die Vulnerabilität deutscher Wirtschaftszweige in Verbindung mit dem Exportvolumen, so wird deutlich, dass die größte Vulnerabilität beim Export von Maschinen für die Textil-, Bekleidungs- und Lederproduktion [2826], von Getreide, Hülsenfrüchten und Ölsaaten [111], von Verbrennungsmotoren und Turbinen [2811] und von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren [2391] liegt (Abbildung 4, Tabelle 12). Der Vulnerabilitätswert zeigt den gewichteten Mittelwert des ND-GAIN-Rankings der Absatzmärkte. Die Vulnerabilitätsskala ähnelt wieder den Grenzwerten des ND-GAIN-Rankings. Die Ergebnisse der Wirtschaftszweige mit einem Exportvolumen von mindestens einer Milliarden US-Dollar (ab einem Vulnerabilitätswert von 33) überschreiten hierbei nicht den Wert 54,64.

Abbildung 4: Vulnerabilität und Exportvolumen ausgewählter deutscher Wirtschaftszweige (Darstellung in ISIC-Kategorien)



Quelle: Eigene Darstellung, adelphi.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass ein hoher Teil der Exportvulnerabilität und auch des Exportvolumens für Deutschland im Bereich des verarbeitenden Gewerbes liegt, welches in 2017 knapp ein Viertel der deutschen Bruttowertschöpfung erwirtschaftet hat (Heymann 2019). Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ImpactCHAIN verweisen zudem auf eine hohe Vulnerabilität von Exportprodukten wie Maschinen, chemischen Erzeugnissen, Kraftwagen und Kraftwagenteilen (Peter et al. 2019a).

Tabelle 12: Detaillierte Ergebnisse vulnerabler Wirtschaftszweige mit einem Exportvolumen von mindestens einer Milliarden US-Dollar, absteigend nach Vulnerabilitätswert (Ausschnitt der 20 vulnerabelsten Wirtschaftszweige)

ISIC-Kategorie	Beschreibung	Exportvolumen (Mrd. USD)	ND-GAIN (hoch = vulnerabel)	Klima-Risiko-Index (niedrig = vulnerabel)	Konzentration (hohe Konzentration = 1)
2826	Herstellung von Maschinen für die Textil-, Bekleidungs- und Lederherstellung	4,19	54,64	66,54	0,14
111	Anbau von Getreide (ohne Reis), Hülsenfrüchten und Ölsaaten	2,45	48,71	82,40	0,18
2811	Herstellung von Verbrennungsmotoren und Turbinen (ohne Motoren für Luft und Straßenfahrzeuge)	5,33	43,83	76,25	0,09
2391	Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren	1,16	43,18	73,08	0,04
3012	Bau von Freizeit- und Sportbooten	1,44	41,19	106,43	0,29
2815	Herstellung von Öfen und Brennern	1,76	38,58	69,34	0,07
1312	Textilwarenherstellung	2,10	38,08	73,93	0,12
2021	Herstellung von Pestiziden und anderen agrochemischen Erzeugnissen	4,06	37,96	67,20	0,06
2012	Herstellung von Düngemitteln und Stickstoffverbindungen	2,04	37,25	73,05	0,12
2030	Herstellung von synthetischen Fasern	1,89	35,87	70,59	0,17
2710	Herstellung von Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren und Stromverteilungs- und Steuergeräten	47,59	35,81	69,43	0,07
2822	Herstellung von Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung	14,06	35,26	64,34	0,10
2825	Herstellung von Maschinen für die Lebensmittel-, Getränke- und Tabakverarbeitung	3,71	35,22	69,16	0,06
2829	Herstellung von sonstigen Spezialmaschinen (zum Beispiel Papiererzeugung, Verarbeitung von Kunststoffen)	26,27	34,73	67,42	0,09
2819	Herstellung von sonstigen nicht wirtschaftszweigspezifischen Maschinen	28,48	33,81	70,13	0,05
3030	Luft- und Raumfahrzeugbau	34,68	33,77	70,56	0,13
2651	Herstellung von Mess-, Kontroll-, Navigations- u. ä. Instrumenten und Vorrichtungen	28,53	33,56	67,43	0,08

ISIC-Kategorie	Beschreibung	Exportvolumen (Mrd. USD)	ND-GAIN (hoch = vulnerabel)	Klima-Risiko-Index (niedrig = vulnerabel)	Konzentration (hohe Konzentration = 1)
2824	Herstellung von Bergwerks-, Bau- und Baustoffmaschinen	10,29	33,45	73,07	0,07
1399	Herstellung von technischen Textilien	4,80	33,25	70,71	0,06
2814	Herstellung von Lagern, Getrieben, Zahnrädern und Antriebselementen	14,80	32,58	68,03	0,07

Zukünftige Risiken und Chancen für die Bedingungen auf Absatzmärkten

Weltweite Handelsentwicklungen beeinflussen den deutschen Exportmarkt unabhängig von Klimawandelfolgen (BMW 2019c). Dies führt zu großen Unsicherheiten bei der Projektion zukünftiger Bedingungen auf Absatzmärkten (BAFU 2017). Übergeordnete Einflussfaktoren für die Entwicklung der Absatzmärkte sind Entwicklungen in der Finanzwirtschaft, von Technologien, im politischen Umfeld sowie bei regulatorischen Rahmenbedingungen (Peter et al. 2019a).

Zusätzlich können sich Klimafolgen in Absatzländern auf die zukünftige Nachfragestruktur im Außenhandel auswirken. Die OECD Export-Prognose geht von einem weltweiten Exportrückgang von 1,8 Prozent bis 2060 im Vergleich zu einem Szenario ohne Klimawandel aus (Dellink et al. 2017). Zudem wird erwartet, dass die Schadensfolgen des Klimawandels zu einer Dämpfung des zukünftigen Wirtschaftswachstums führen werden (Peter und Schwegler 2012). Dies kann die Auftragslage deutscher Exporte, besonders in klimavulnerable Länder, beeinflussen und gleichzeitig zu einer Minderung der Bruttowertschöpfung führen (Schwank et al. 2007; Lühr et al. 2014; Dellink et al. 2017). Eine verstärkte Nachfrage nach deutschen Produkten könnte eher in nicht-vulnerablen Ländern und Ländern mit steigender Kaufkraft auftreten (Bräuer et al. 2009). Eine Verschiebung der deutschen Absatzmärkte ist daher nicht auszuschließen. Ein Rückgang der Kaufkraft und des privaten Konsums wird im Export von Luxusgütern erwartet (Bräuer et al. 2009; Peter et al. 2019a).

Zukünftige Kaufkraft- und Nachfrageänderungen können jedoch nicht nur Risiken, sondern auch Chancen für den deutschen Außenhandel bieten. So ist zum Beispiel eine Änderung der Nachfrage hin zu Investitionsgütern zur Anpassung an den Klimawandel und Schadensbekämpfung sowie zu klimaresilienten Baumaterialien wahrscheinlich (Heymann 2007; Lühr et al. 2011b; Hauff 2013). Dies eröffnet Chancen für die zukünftige Produktentwicklung deutscher Unternehmen in diesen Wirtschaftszweigen. Auch für Exporte der Chemieindustrie wird ein Anstieg des zukünftigen Absatzes erwartet. Dies betrifft besonders den Einsatz von Chemieprodukten im Energiesektor, in der Landwirtschaft und in der Pharmaindustrie (Bräuer et al. 2009; Gebauer et al. 2011). Die steigende Nachfrage nach Technologien zur Anpassung an den Klimawandel bieten zudem ein hohes Marktpotenzial im Spezial- und Maschinenbau sowie in der chemischen Industrie (Lühr et al. 2011b; Lühr et al. 2014). Der Maschinenbau und die chemische Industrie gehören zu den wichtigsten Wirtschaftszweigen im deutschen Außenhandel. Eine Zunahme der Nachfrage kann somit nennenswerte Auswirkungen auf die zukünftige Entwicklung des deutschen Exportmarktes haben.

Auch die Erschließung neuer Absatzmärkte wird durch eine Nachfrageänderung begünstigt (Lühr et al. 2014). Eine Veränderung der Konsumpräferenzen zu nachhaltigen Konsumgütern und steigende Investitionen in Emissionsminderungstechnologien zeigen neue Chancen für deutsche Unternehmen auf (Lühr et al. 2014). Zudem werden positive Beschäftigungseffekte bei steigenden Investitionen in Klimaschutz- und Anpassungstechnologien erwartet (Blazejczak et

al. 2019a) (siehe 2.2.3). Weiterhin wird von einem Anstieg der Nachfrage nach Beratungsdienstleistungen zu Klimaschutz- und Anpassungstechnologien ausgegangen (Bardt et al. 2012; Peter et al. 2019a). Die genannten Chancen sind jedoch stark von der Fähigkeit deutscher Unternehmen abhängig, Handlungsbedarf frühzeitig zu erkennen und die entstehenden Potenziale umzusetzen (Peter et al. 2019b).

Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Warenexporte Österreichischer und Schweizer Unternehmen zeigen ähnliche Projektionen auf. Für die Absatzmärkte der österreichischen Exportwirtschaft wurde mit Szenarioanalysen für das Jahr 2050 eine Abnahme der Warenexporte besonders in klimavulnerable Länder wie China und Indien projiziert (Peter und Schwegler 2012). Für die Schweiz wird mit einer Gefährdung des Exportmarktes von bis zu 2,5 Prozent bis 2050 gerechnet (Schwank et al. 2007). Es wird davon ausgegangen, dass es besonders bei Exporten in klimavulnerable Länder zu Absatzschwankungen kommt (BAFU 2017). Die Szenarioanalyse für die Schweiz zeigt dabei eine Nachfrageabnahme bei Luxusgütern und im Fahrzeugbau (Schwank et al. 2007). Gleichzeitig bieten sich Chancen besonders im Bereich ingenieurtechnischer Anpassungsdienstleistungen (BAFU 2017). In den Analysen beider Länder haben die internationalen Einflüsse des Klimawandels größere Auswirkungen auf die Absatzmärkte als die nationalen Einflüsse (Schwank et al. 2007; Peter und Schwegler 2012).

Aufgrund der benannten Unsicherheiten und dem hohen Einfluss wirtschaftlicher und politischer Faktoren können für die Entwicklung der Absatzmärkte keine detaillierten Aussagen für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts getroffen werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 13: „Bedingungen auf Absatzmärkten (international)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Bedingungen auf Absatzmärkten (international)“

- ▶ Der Handel mit klimavulnerablen Ländern zeigt für deutsche Unternehmen Risiken wie Nachfrageänderungen und Verschiebungen zukünftiger Absatzmärkte auf. Für verschiedene Wirtschaftszweige des Maschinenbaus wurden mittlere bis hohe Vulnerabilitätswerte ermittelt.
- ▶ Der niedrige Konzentrationswert der Absatzmärkte lässt vermuten, dass im Fall von Nachfrageänderungen nur geringe Absatzmengen je nach Land betroffen sind.
- ▶ Zudem ergeben sich auch Chancen durch die Erschließung neuer Absatzmärkte, besonders in der Bau- und Chemiebranche.
- ▶ Speziell im Bereich Klimaschutz- und Anpassungstechnologien kann eine Zunahme der Nachfrage nach Produkten und Beratungsdienstleistungen erwartet werden.

2.2.3 Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Umwelttechnologien werden technologische Produkte, Verfahren und Dienstleistungen der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz bezeichnet, die die Umwelt entlasten und zu einer nachhaltigen Wirtschaftsentwicklung beitragen (Edler et al. 2007; BMU 2017; Henzelmann et al. 2018). Dies beinhaltet sowohl Klimaschutz- wie auch Anpassungstechnologien. Oftmals erfolgt eine Unterteilung der Umwelttechnologien in Leitmärkte wie etwa Rohstoff- und Materialeffizienz, Speicherung und Verteilung von Energie, umweltfreundliche Erzeugung, Energieeffizienz, nachhaltige Wasserwirtschaft, nachhaltige Mobilität und Kreislaufwirtschaft (Henzelmann et al. 2018). Als vielversprechende Umweltschutztechnologien gelten zum Beispiel E-Mobilität, Lithium-Ionen-Akkus, industrielle Abwärmenutzung und das Recycling von Photovoltaik-Anlagen (Blazejczak et al. 2019b). Zu den innovativen Anpassungstechnologien zählen unter anderem Technologien zur Regenwassersammlung, neuartige Wettervorhersage- und Warnsysteme und effiziente Bewässerungssysteme (Fichter 2016).

Der deutsche Markt für Umwelttechnologien stellt einen bedeutsamen Wachstumsmarkt dar. Grund dafür sind unter anderem der wachsende Einsatz von Klimaschutz- wie auch Anpassungstechnologien und die Bestrebungen zur Umsetzung internationaler Klimaschutzabkommen (Hauff 2013; Gehrke und Schasse 2017). Deutsche Unternehmen profitieren im internationalen Markt für Umwelttechnologien von ihrer Innovationsstärke (Hauff 2013). Im europäischen Eco-Innovation Index befindet sich Deutschland seit 2010 unter den fünf innovativsten Ländern und belegte 2018 Platz 2 hinter Luxemburg (Spain et al. 2018).

2016 lag der Anteil von Umwelttechnologien am deutschen Bruttoinlandsprodukt bei 15 Prozent. Betrachtet man den Anteil deutscher Unternehmen auf dem Weltmarkt, so betrug dieser 14 Prozent im Bereich Umwelttechnologien und Ressourceneffizienz. Im Vergleich dazu lag der Anteil Deutschlands an der globalen Wirtschaftsleistung bei 4,6 Prozent. Dies unterstreicht die starke internationale Wirtschaftsleistung deutscher Unternehmen im Bereich der Umwelttechnologien. Knapp 90 Prozent der deutschen Unternehmen in der Branche sind kleine und mittlere Unternehmen (Lühr et al. 2011b; Henzelmann et al. 2018).

Die Entwicklung des Marktes für Umwelttechnologien wird durch verschiedene Initiativen begleitet. Die Exportinitiative Umwelttechnologien des BMU hat zum Ziel, mit ausgewählten Projekten die Rahmenbedingungen zur Anwendung von deutschen Umwelttechnologien in Ländern mit Unterstützungsbedarf zu fördern (BMU 2017). Auf europäischer Ebene existieren verschiedene Rahmenprogramme und Aktionspläne, die Forschungs- und Umsetzungsvorhaben im Bereich der innovativen Umwelttechnologien unterstützen (Europäische Kommission 2011; Blazejczak et al. 2019a). Das Netzwerk Innovation und Gründung im Klimawandel identifiziert innovative Klimaanpassungstechnologien und unterstützt die Innovationsentwicklung deutscher Unternehmen in der Branche (Fichter 2016).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Für die Entwicklung von Wettbewerbsvorteilen in innovativen Umwelttechnologien entstehen zukünftig Chancen für deutsche Unternehmen (van Bergen et al. 2008; Popp und Schüll 2009; Lühr et al. 2011b). Hohe Potenziale werden unter anderem beim Absatz in Schwellen- und Entwicklungsländer gesehen, von denen eine steigende Nachfrage nach Umwelttechnologien erwartet wird (Gehrke und Schasse 2017). Die deutsche Anpassungsstrategie sieht neben wachsenden Exportmärkten auch im inländischen Absatzmarkt Chancen für deutsche Unternehmen in innovationsträchtigen Sektoren (Bundesregierung 2008). Wirtschaftszweige mit hohem Innovationspotenzial im Bereich der Anpassungstechnologien sind die meteorologische Messtechnik, die

Wasser- und Bauwirtschaft und die Land- und Forstwirtschaft (Beucker et al. 2014; Lühr et al. 2014). Speziell die nachhaltige Wasserwirtschaft und an die Folgen des Klimawandels angepasste Infrastrukturen haben ein hohes Wachstumspotenzial (Ott und Richter 2008; Henzelmann et al. 2018). Innovative Anpassungstechnologien bieten insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen große Marktchancen, da diese bereits heute stark in der Branche vertreten sind und über eine breite Aufstellung in dem Bereich verfügen (Voß und Hartmann 2010). Gleichzeitig existieren zukünftige Chancen durch die Nutzung von Wettbewerbsvorteilen auf globalen Märkten und bei der Entwicklung neuer Leitmärkte (Lühr et al. 2011b).

Der Umwelttechnik-Atlas für Deutschland erwartet eine Steigerung des Anteils von Umwelttechnologien am Bruttoinlandsprodukt von 15 Prozent im Jahr 2016 auf 19 Prozent in 2025 (Henzelmann et al. 2018). Für das globale Marktvolumen wird im Bereich der Anpassungstechnologien ein Wachstum von 4,1 Prozent im Jahr 2016 auf 11 Prozent im Jahr 2025 erwartet. Dies beruht auf der Annahme, dass stärkere Auswirkungen des Klimawandels in Zukunft zu einer gesteigerten Nachfrage nach Anpassungstechnologien führen (Lühr et al. 2014).

Unternehmensbefragungen zum Geschäftsklima der Branche zeigen jedoch große Unsicherheiten für zukünftige Entwicklungen. Diese Unsicherheiten sind größtenteils politisch und wirtschaftlich bedingt und stehen nicht direkt in Verbindung mit den Auswirkungen des Klimawandels (Henzelmann et al. 2018). Zusätzlich muss mit einer verstärkten Zunahme des Wettbewerbs auf dem globalen Markt für Umwelttechnologien gerechnet werden (Edler et al. 2007; Blazejczak et al. 2019b).

Aktuelle Studien behandeln überwiegend die Entwicklung und das Potenzial innovativer Umweltschutztechnologien. Zukünftige Wettbewerbsvorteile innovativer Anpassungstechnologien sind in geringerem Ausmaß erforscht. Projektionen für die Entwicklung innovativer Umwelttechnologien für die Mitte und für das Ende des Jahrhunderts liegen nicht vor.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 14: „Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Chancenarm	Optimistisch	Chancenarm
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	gering	mittel	gering
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien“

- ▶ Für innovative Umwelttechnologien wird bis 2025 ein starkes Marktwachstum erwartet. Darüber hinaus liegen keine Projektionen vor, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Wachstumspotenzial bestehen bleibt.
- ▶ Demgegenüber stehen Unsicherheiten in der zukünftigen Marktentwicklung und ein internationaler Wettbewerbsdruck.
- ▶ Deutsche Unternehmen und insbesondere kleine und mittlere Unternehmen besitzen ein hohes Innovationspotenzial. Im Bereich der Anpassungstechnologien sind besonders die Wasser- und Bauwirtschaft Wirtschaftszweige mit hohem Wachstumspotenzial.

2.2.4 Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs

Hintergrund und Stand der Forschung

Viele deutsche Unternehmen, auch kleine und mittlere Unternehmen, sind stark in globale Handelsnetze eingebunden (Lühr et al. 2014). Der internationale Warentransport per Schiff, Flugzeug, LKW und Bahn hat eine bedeutende Rolle für die deutsche Wirtschaft. Dabei hat speziell der internationale Schiffsverkehr, der für den Transport von 80 Prozent des globalen Handelsvolumens verantwortlich ist, eine hohe Relevanz (Dellink et al. 2017). Im Jahr 2018 wurden 300 Millionen Tonnen an Gütern über deutsche Seehäfen transportiert (Destatis 2019e). Bei knapp einem Viertel der transportierten Güter handelte es sich um Kohle, rohes Erdöl, Erdgas und Bergbauerzeugnisse (Erze, Steine, Erden) (Destatis 2019d). Beim landgestützten Warentransport dominiert der Straßenverkehr, welcher für den innereuropäischen und kontinentalen Transport von großer Bedeutung ist (Destatis 2019e).

Die weltweiten Handelsverflechtungen Deutschlands führen zu Abhängigkeiten, in denen selbst kurzfristige Kapazitätsengpässe entlang der gesamten Lieferkette sich negativ auf die Logistik und den Handel auswirken und somit auch den Warentransport aus und nach Deutschland betreffen können (Zanker 2018). Klimatische Einflüsse und extreme Wetterereignisse wie Starkniederschläge, Starkwinde, Sturmfluten und Hitzeperioden beeinträchtigen die Verkehrsinfrastruktur und können zu negativen Auswirkungen für den internationalen Warentransport führen (siehe 2.2.1) (Lühr et al. 2014). Besonders der internationale Seeschiffsverkehr ist durch die Folgen des Klimawandels betroffen (Peter et al. 2019a).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Auswirkungen der Folgen des Klimawandels auf die zukünftige Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs unterscheiden sich nach Verkehrsmittel.

Die Folgen des Klimawandels für den internationalen Seeschiffsverkehr weisen hohe Risiken für deutsche Unternehmen auf. Extreme Wetterereignisse, der Anstieg des Meeresspiegels und erhöhte Wasserstände während Sturmfluten beeinflussen internationale Transportrouten und können Hafenanlagen und Containerterminals beschädigen (Vonk et al. 2015; Peter et al. 2019a). Viele Hafenanlagen sind extremen Wetterereignissen ausgesetzt – ein Drittel der weltweiten Häfen befinden sich in Regionen, die von tropischen Stürmen betroffen sind (Becker et al. 2018). Einige internationale Häfen, wie der Hafen Busan in Südkorea und der Hafen von New York/ New Jersey in den USA, haben schon Schäden durch Extremwetterereignisse erlitten, welche durch einen starken Klimawandel noch weiter zunehmen können (Becker et al. 2018). Eine temporäre Schließung von Häfen während und nach extremen Wetterereignissen kann nicht ausgeschlossen werden (Dellink et al. 2017). Falls kleinere Hafenanlagen nicht in der Lage sein können, nötige Anpassungsmaßnahmen durchzuführen, kann eine endgültige Schließung und Verdichtung von Hafenanlagen erwartet werden (Peter et al. 2019b). In diesem Fall müssten deutsche Unternehmen gegebenenfalls die Nutzung anderer Hafenanlagen erwägen.

Der Klimawandel hat zudem Auswirkungen auf die Schiffbarkeit der internationalen Seeschiffahrtsstraßen. So kann zum Beispiel eine klimawandelbedingte Beeinträchtigung des Panamakanals, über den 22 Prozent des weltweiten Sojatransportes abgewickelt werden, zu Veränderungen im internationalen Warentransport, besonders im Bereich der Nahrungsmittelindustrie, führen. Gleichzeitig bieten sich auch Chancen durch eine mögliche Erschließung des Seeweges nördlich des amerikanischen Kontinents, der Nord-West-Passage, bis zum Ende des Jahrhunderts, welche eine Reduktion der Dauer und der Kosten des Warenverkehrs zur Folge hätte (EEA 2017a; Peter et al. 2019a).

Bei Betrachtung der zukünftigen Entwicklungen des internationalen Flugverkehrs kann eine Zunahme von extremen Wetterereignissen Auswirkungen auf die Lieferzeiten und mögliche Verteuerungen von internationalen Warentransporten haben (EASA et al. 2019). Die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs und extremer Wetterereignisse können die Warenabfertigung auf Flughäfen beeinträchtigen und Verspätungen im Warentransport bedingen. Hitzeperioden können zudem zu Einschränkungen der Flugzeugleistung und zu einer damit verbundenen notwendigen Lastenreduktion führen (EEA 2017a).

Das Schienennetz in Europa ist in Zukunft vor allem kurzfristigen Risiken durch Extremwetterereignisse wie Hitze, Stürmen und Starkniederschlägen ausgesetzt. Dies kann punktuell zu Verspätungen und Unterbrechungen führen (Bräuer et al. 2009; Lühr et al. 2014; Hirschfeld et al. 2016). Auch eine Verformung der Schienen durch Hitze wird besonders in Regionen, die hohen Temperaturen ausgesetzt sind, erwartet (Peter et al. 2019a). Für den Zeitraum 2040 bis 2050 wird ein signifikanter Anstieg der Kosten extremer Wetterereignisse für den europäischen Schienenverkehr projiziert (EEA 2017a). Diese Kosten können mitunter auch Auswirkungen auf Unternehmen haben, welche Warentransporte über den Schienenverkehr durchführen.

Auch im Straßenverkehr bestehen zukünftige Risiken durch die Auswirkungen von Extremwetterereignissen und steigenden Temperaturen (Bräuer et al. 2009; Peter et al. 2019a). So kann sich bei zu großer Hitze der Straßenbelag verformen. Außerdem können Fahrzeuge und Fahrzeuginnenräume schneller überhitzen, was die Beförderung von Gütern zusätzlich erschwert. Weiterhin führen gravitative Massenbewegungen zu Einschränkungen in der Befahrbarkeit von Transportwegen (Ott und Richter 2008). Für deutsche Unternehmen haben diese Risiken potenziell negative Auswirkungen auf die Produktion. Dies ist speziell bei Liefer- und Produktionsmechanismen wie „just-in-time“ der Fall (Chrischilles und Mahammadzadeh 2014).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 15: „Beeinträchtigung des internationalen Warentransports“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Beeinträchtigung des internationalen Warentransports“

- ▶ Der Klimawandel hat unterschiedliche Auswirkungen auf die jeweiligen Verkehrsmittel des internationalen Warentransports. Zunehmende Risiken ergeben sich für den internationalen Schiffsverkehr, welcher 80 Prozent des weltweiten Handelsvolumens transportiert.
- ▶ Der Flug-, Straßen- und Schienenverkehr kann zunehmend durch die Folgen extremer Wetterereignisse beeinträchtigt werden. Detaillierte Projektionen zu den Auswirkungen auf den internationalen Warentransport liegen nicht vor.
- ▶ Die konkreten Auswirkungen sind zudem abhängig von den Branchen und verwendeten Handelsrouten deutscher Unternehmen.

2.2.5 Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Warenverkehr über Wasserstraßen umfasst den Transport von Gütern über Binnen- und Küstenwasserstraßen sowie Seegewässer (BMVI 2016b). Der Gütertransport auf Bundeswasserstraßen ist ein bedeutender Standortfaktor (BfG et al. 2015). Dank ihrer zentralen Lage innerhalb Europas sind die deutschen Binnenschiffahrtsstraßen, insbesondere der Rhein, wichtige Transportwege für den internationalen Warenverkehr (Schubert et al. 2014; Hütter 2016).

2018 wurden knapp 200 Millionen Tonnen Güter auf deutschen Binnenwasserstraßen transportiert (Destatis 2019d). Die Binnenschiffahrt befördert größtenteils Massengüter wie Erze, Steine und Erden sowie Kokerei- und Mineralölerzeugnisse. Weiterhin werden Energieträger wie Kohle, rohes Erdöl und Erdgas über deutsche Binnenwasserstraßen transportiert (Hütter 2016; Destatis 2018b). Knapp zwei Drittel des europäischen und 80 Prozent des deutschen Gütertransports der Binnenschiffahrt erfolgt über den Rhein (Enei et al. 2010; Hoffmann et al. 2011; Nilson et al. 2014). Die deutsche Seeschiffahrt beförderte 2018 knapp 295 Millionen Tonnen Güter, wobei diese fast ausschließlich für den internationalen Warentransport bestimmt waren (siehe 2.2.4) (Destatis 2019d).

Im Bundesverkehrswegeplan 2030 sind 9,3 Prozent der verfügbaren Mittel für den Verkehrsträger Wasserstraße vorgesehen (BMVI 2016a). Die Verkehrsverflechtungsprognose prognostiziert einen Zuwachs des Transportaufkommens per Binnenschiff um 20 Prozent bis 2030 im Vergleich zu 2010 (Schubert et al. 2014). Weiterhin wird eine Zunahme des Gesamtumschlagsvolumens deutscher Seehäfen im gleichen Zeitraum um 74 Prozent erwartet (BMVI 2016a).

Beim Warenverkehr über Bundeswasserstraßen werden große Schiffstypen mit hohem Tiefgang präferiert, da sie größere Mengen transportieren können (BfG et al. 2015). So sinken die anteiligen Fixkosten pro Fahrt. Auch für den Schwerlastverkehr und den Transport von sperrigen Gütern, bei denen ein Transport per Schiene oder Straße nur erschwert möglich ist, werden bevorzugt große Schiffstypen eingesetzt (GDWS 2013). Schiffe mit hohem Tiefgang sind jedoch anfälliger für Niedrigwasserereignisse (BfG et al. 2015).

Der Warenverkehr über Bundeswasserstraßen wird durch verschiedene klimatische Einflüsse wie Schwankungen im Wasserstand (Hoch- und Niedrigwasser) und extreme Wetterereignisse (Stürme, Sturmfluten und Trockenperioden) beeinträchtigt (Enei et al. 2010). Neben direkten Auswirkungen auf die Bundeswasserstraßen können klimatische Einflüsse wie Stürme und Hochwasser auch Schäden an maritimen Infrastrukturen verursachen (siehe „Schäden an Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen“ im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“) (Schade et al. 2011).

2013 führten Hochwasser an der Elbe und der Donau zur zeitweisen Sperrung von Bundeswasserstraßen und verzögerten damit den Gütertransport. Einen starken Einfluss auf die Schiffbarkeit von Binnengewässern haben Niedrigwasserereignisse (siehe „Schiffbarkeit der Wasserstraßen (Niedrigwasser)“ im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“) (Schade et al. 2011; Hänsel et al. 2020; Nilson et al. 2020). Bei extremen Niedrigwasserständen können insbesondere große Schiffe nicht mehr voll abladen. Vor allem bei lang andauernden Niedrigwasserphasen entstehen somit Mehrkosten für die betroffenen Unternehmen (BfG et al. 2015; Vonk et al. 2015). Lieferverzögerungen oder kostenintensive Umladungen auf andere Verkehrsträger können nicht ausgeschlossen werden. Hier besteht das Risiko, dass die hohen Transportmengen, die von großen Schiffstypen transportiert werden, nicht durch andere Verkehrsträger aufgefangen werden können (Nilson et al. 2014). Erschwert ein sinkender Beladungsgrad den Transport von Schwerlasten, können Lieferverzögerungen für die betroffenen Industrien entstehen.

Auf Küstenwasserstraßen und Seegewässern können Stürme extreme Hochwasserstände verursachen, die die Schifffahrt beeinträchtigen und bei starkem Seegang mitunter zum Ladungsverlust führen (Schade et al. 2020). In den letzten Jahren führten Hochwasser immer wieder zu Behinderungen der Seeschifffahrt im Nord-Ostsee-Kanal (Ganske et al. 2018). Diese Problematik wird durch den projizierten Meeresspiegelanstieg weiter verstärkt (Schade et al. 2020).

Verschiedene Forschungsprojekte untersuchen die Auswirkungen des Klimawandels auf Warentransport über Bundeswasserstraßen. Das Themenfeld 1 des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) erforscht, wie sich der Verkehr und die Infrastruktur an den Klimawandel und Extremwetterereignisse anpassen kann (Hänsel et al. 2020). Dabei werden in verschiedenen Arbeitsschwerpunkten auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Schifffahrt auf Bundeswasserstraßen und die Risiken für den Warenverkehr betrachtet (Nilson et al. 2020). Auch das Forschungsprogramm KLIWAS (2009 bis 2013) hat die Auswirkungen des Klimawandels auf Bundeswasserstraßen und die Schifffahrt in Deutschland betrachtet. Dabei wurden im Binnenbereich die Flussgebiete Rhein, Elbe und Donau und als Küstengewässer die Nordsee auf Veränderungen in der Schifffahrt und der Transportleistung analysiert (Nilson et al. 2014; BfG et al. 2015).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Für den Transport per Schiff sind neben den Fahrwasserbedingungen wie Tiefe und Breite auch die Eigenschaften der auf den jeweiligen Flussabschnitten üblicherweise verkehrenden Schiffstypen relevant. Um zukünftige Beeinträchtigungen des Warenverkehrs über Bundeswasserstraßen darzustellen, wurde der potenzielle mittlere Beladungsgrad ermittelt (*Indikatoren-ID: IG-KL-09*)⁷. Dieser Wert beschreibt, wie viel Prozent seiner maximalen Ladung ein Schiff bei den am jeweiligen Tag gegebenen Tiefenverhältnissen potenziell transportieren kann. Bei gegebenen Fixkosten ist die Wirtschaftlichkeit am größten, das heißt die Stückkosten pro Tonne am geringsten, wenn große Schiffe ihre Kapazität voll ausschöpfen können. Der Beladungsgrad ist damit ein einfacher Indikator für die Wirtschaftlichkeit und Kosten des Schiffstransportes. Es wurden die Beladungsgrade für Schiffstypen ermittelt, die die Pegel Ruhrort⁸, Kaub⁹ und Maxau¹⁰ häufig passieren. Die Wassertiefeninformationen beruhen auf projizierten Zeitreihen täglicher Abflüsse, die mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen für das RCP8.5-Szenario in einem fünf mal fünf Kilometer-Raster simuliert wurden (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“). Die Abflusswerte wurden anhand der an den Pegel gültigen Wasserstands-Abflussbeziehungen in zur Verfügung stehenden Fahrrinntiefen umgerechnet. Dargestellt werden 30-jährlich gleitende Mittelwerte der Beladungsgrade im hydrologischen Sommerhalbjahr, der am Mittel- und Niederrhein übliche Niedrigwassersaison.¹¹

Die Projektionen für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts zeigen, dass mit einer Abnahme des mittleren Beladungsgrads für alle Schiffstypen zu rechnen ist (Abbildung 5 bis Abbildung 7). Die Abnahmen sind dabei erwartungsgemäß bei großen Schiffstypen größer als bei kleineren. Für Unternehmen könnten somit in Zukunft höheren Kosten für den Warentransport entstehen. Für verschiedene Abflussszenarien des Rheins wurden Transportkostenänderungen von minus bis plus fünf Prozent für die Mitte und von bis zu plus zehn Prozent Kostensteigerungen für das Ende des Jahrhunderts für ausgewählte Schiffstypen und Güter berechnet (Nilson et al. 2014; BfG et al. 2015).

⁷ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

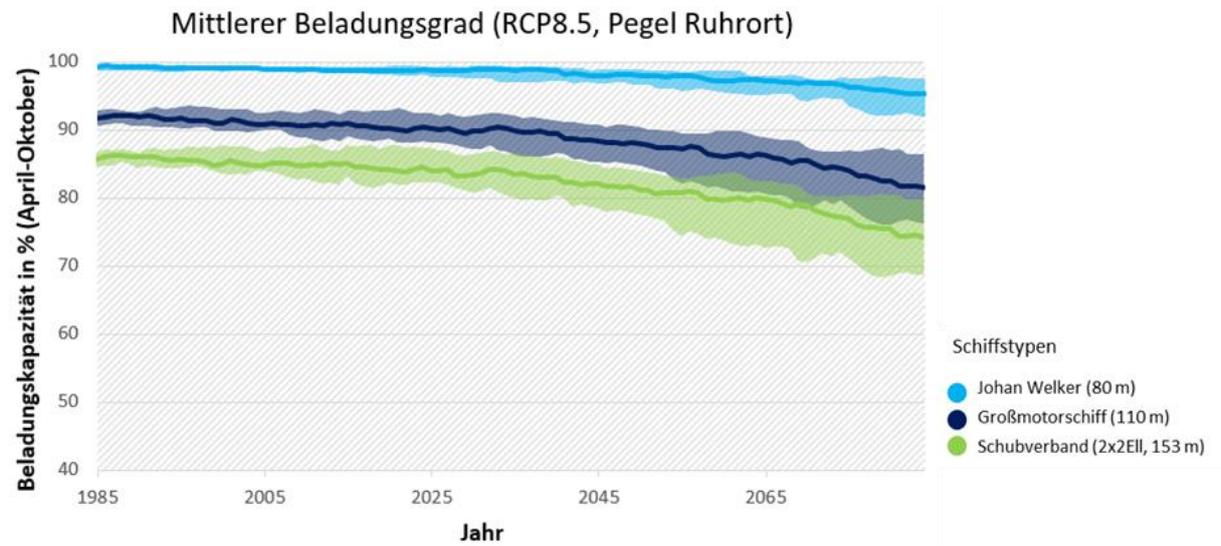
⁸ Niederrhein; Typen: Johann Welker, GMS-110, 4x4 Schubverband

⁹ Mittelrhein, Typen Johann Welker, GMS-110

¹⁰ Oberrhein, Typen Johann Welker, GMS-110

¹¹ Autor dieses Abschnitts ist Enno Nilson, Bundesanstalt für Gewässerkunde.

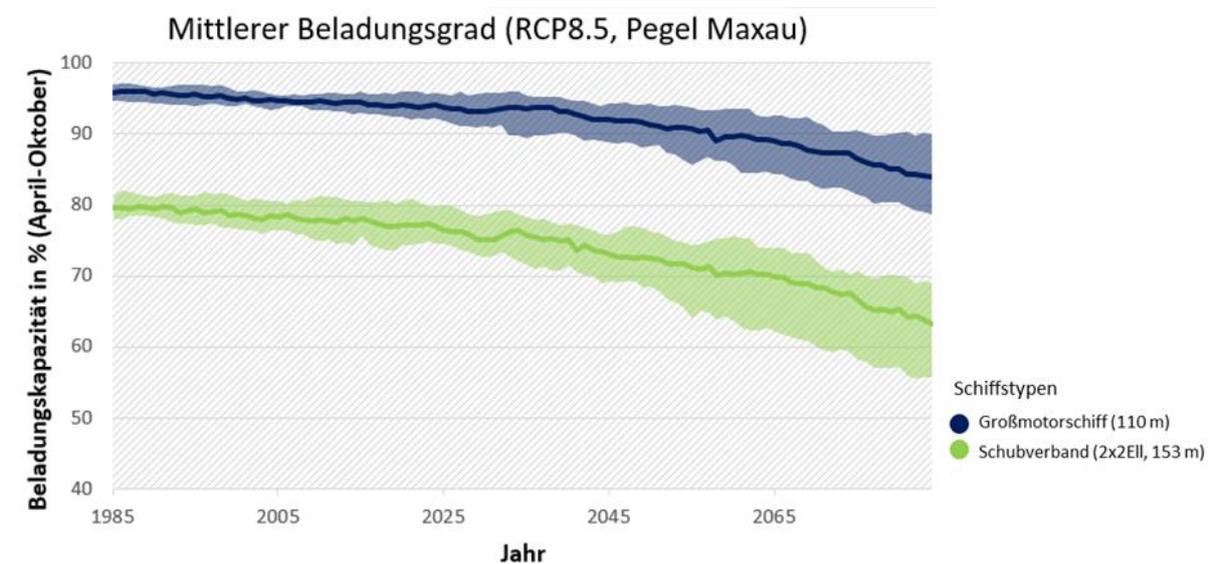
Abbildung 5: Potenzielle mittlere Beladungsgrade für häufige Schiffstypen für die Pegel Ruhrort, Kaub und Maxau während des hydrologischen Sommerhalbjahres für den Zeitraum 1985 bis 2085



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

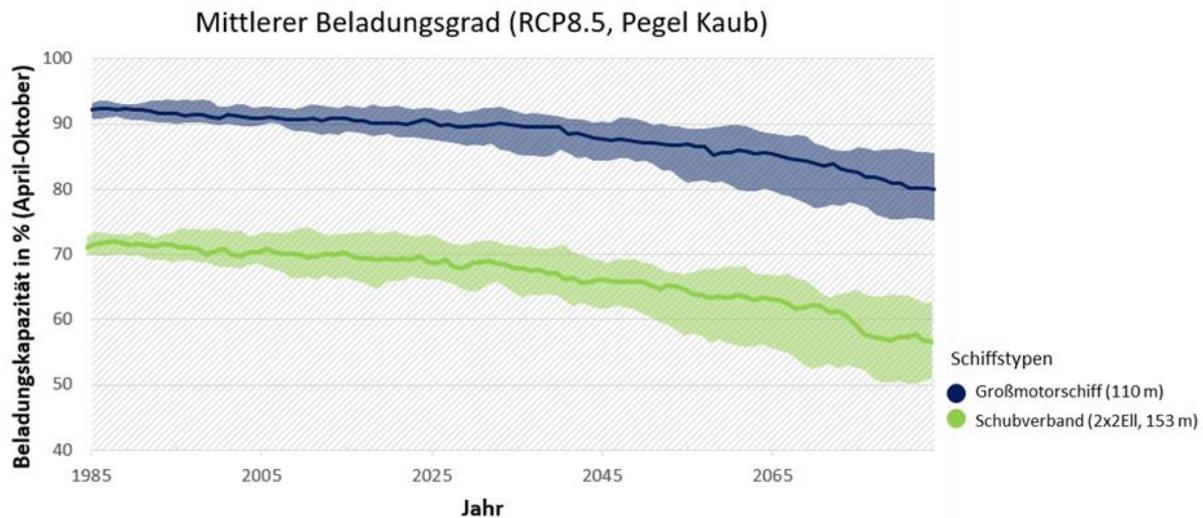
Hinweis: Das oben aufgeführte Diagramm sowie die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Projektionen für das RCP8.5-Szenario. Die mittlere Linie stellt dabei das 50. Perzentil dar, die unteren und oberen Enden der schraffierten Fläche das 15. beziehungsweise 85. Perzentil.

Abbildung 6: Potenzielle mittlere Beladungsgrade für häufige Schiffstypen für den Pegel Maxau während des hydrologischen Sommerhalbjahres für den Zeitraum 1985 bis 2085



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Abbildung 7: Potenzielle mittlere Beladungsgrade für häufige Schiffstypen für den Pegel Kaub während des hydrologischen Sommerhalbjahres für den Zeitraum 1985 bis 2085



Für die Bundeswasserstraßen Rhein, Donau, Elbe, Ems und Weser werden ähnliche Tendenzen projiziert. Ausgehend von Daten zur Entwicklung von Niedrigwasserabflüssen lassen sich bis zur Mitte des Jahrhunderts moderate Veränderungen der Abladeverhältnisse für die Schifffahrt vermuten (Nilson et al. 2020). Für die zweite Jahrhunderthälfte zeigt die Mehrheit von Projektionen längere Niedrigwasserphasen, die sich in geringeren Beladungsgraden und höheren Kosten niederschlagen könnten. Im Flussgebiet der Donau sind insbesondere frei fließende Flussabschnitte (Streckenabschnitt Straubing – Vilshofen) von Niedrigwasser betroffen (GDWS 2018).

Die Auswirkungen auf die deutsche Seeschifffahrt werden für die Mitte des Jahrhunderts eher als gering betrachtet, wobei die Risiken zum Ende des Jahrhunderts zunehmen können (BMVBS 2013; Kofalk et al. 2014; BfG et al. 2015).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 16: „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“

- ▶ Bei extremen Niedrigwasserständen kann es im Warenverkehr über Wasserstraßen zu einer Verringerung der Transportmenge, Lieferverzögerungen oder Umladungen auf andere Verkehrsträger kommen.
- ▶ Projektionen für den Rhein zeigen, dass die mittleren Beladungsgrade bis zum Ende des Jahrhunderts abnehmen. Dies kann zu erhöhten Kosten für den Warentransport führen.
- ▶ Einschränkungen im Warentransport sind besonders für frei fließende Abschnitte der als Wasserstraßen genutzten Flüsse zu erwarten.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“

Faktoren der Sensitivität für den inländischen Warenverkehr über Wasserstraßen sind die vorgehaltene Wassertiefe, das Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein einer Stauhaltung der Wasserstraße, der Sedimenthaushalt und der Zustand des Gewässerbettes sowie die Breite der Fahrrinne¹² (Niedrigwasser), die Uferbeschaffenheit, die Durchfahrtshöhe (Hochwasser), sowie die Abmessungen und Tiefenansprüche der auf den jeweiligen Flussabschnitten verkehrenden Schiffe. Die räumliche Exposition wird von der Lage der Bundeswasserstraßen und von der Lage großer Industriestandorte beeinflusst.

Die Untersuchung der Anpassungskapazität bezieht sich auf Beeinträchtigungen des inländischen Warenverkehrs auf deutschen Binnenschiffahrts- und Seeschiffahrtsstraßen. Der internationale Warentransport wird nicht näher betrachtet. Grundsätzlich besteht ein enger Zusammenhang mit der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser) im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“.

Anpassung setzt insbesondere an den Logistikprozessen verladener Unternehmen sowie der Charakteristika der verwendeten Schiffstypen an. Weiterhin können flussbauliche Maßnahmen eine zukünftige Befahrbarkeit der Wasserstraßen und somit den Warentransport ermöglichen.

Die Anpassungskapazität, welche durch eine angepasste Infrastruktur, wie auch durch veränderte Logistikprozesse gestärkt werden kann, betrifft diejenigen Unternehmen, die in hohem Maße auf den Warentransport per Schiff angewiesen sind. Hierbei ergeben sich Unterschiede je nach Gütertyp und befahrener Wasserstraße. In Bezug auf die befahrene Wasserstraße sind beispielsweise freifließende Gewässer von klimawandelbedingten Niedrigwasserperioden tendenziell stärker betroffen als staugeregelte Bundeswasserstraßen (Nilson et al. 2020). Unter Betrachtung des transportierten Gütertyps lässt sich feststellen, dass beispielsweise Container mit vergleichsweise geringem Aufwand auf andere Verkehrsträger verladen werden können (kombinierter Verkehr). Flüssige und feste Massengüter dagegen werden in der Regel lose transportiert, sodass deren Verladung mit höheren Aufwänden verbunden ist.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht folgende Maßnahmen und Instrumente zur Reduzierung der Beeinträchtigung des inländischen Warenverkehrs über Bundeswasserstraßen vor:

Tabelle 17: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
5.4	Aktionsplan "Niedrigwasser Rhein"	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen;	In den vier Handlungsfeldern „Informationsbereitstellung“, „Transport und Logistik“, „Infrastruktur“ und „Langfristige Lösungsansätze“ sind insgesamt acht Maßnahmen aufgestellt worden, mit denen den klimawandelbedingten Herausforderungen für die Industriestandorte am Rhein und seinen Ne-

¹² Siehe auch Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ im Handlungsfeld „Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
		Motivation und Akzeptanz; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	benflüssen begegnet werden soll. Der Aktionsplan "Niedrigwasser Rhein" wurde gemeinsam mit Vertretern großer Industrieunternehmen im Rheineinzugsgebiet und des Binnenschiffahrtsgewerbes entwickelt, um zuverlässig kalkulierbare Transportbedingungen am Rhein sicherzustellen. <ol style="list-style-type: none"> 1. Wasserstandsvorhersage verbessern 2. DAS-Basisdienst Klima & Wasser 3. Aktuelle Tiefeninformationen bereitstellen 4. Transportkonzepte anpassen & Technik optimieren 5. „Abladeoptimierung am Mittel- & Niederrhein“ beschleunigen 6. Schnellere Genehmigungen durch Maßnahmengesetz 7. Wasserbau- & wasserwirtschaftliche Optionen prüfen 8. Gesellschaftlicher Dialog
5.6	Anpassung der Transportkonzepte/Optimierung der Transport- und Ladungsgefäße	Technologie und natürliche Ressourcen	Ziel ist ein optimierter Umgang mit extremen Niedrigwasserereignissen unter den bestehenden Randbedingungen. Neben der Ausschöpfung von Verlagerungsmöglichkeiten sowie Schaffung und Ausschöpfung von Lagerkapazitäten können die Entwicklung und angepasste Verfügbarkeit niedrigwassereignischer Schiffstypen, moderne Leichtersysteme sowie die Digitalisierung der Binnenschiffahrt Ansätze für eine Optimierung bieten. Durch den Bund kann mit begleitenden Maßnahmen eine Unterstützung dieser Ansätze erfolgen.
2.19	Themenfeld 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" im BMVI-Expertenetzwerk	Wissen	m Rahmen von Themenfeld 1 werden unter anderem exemplarische Klimawirkungsanalysen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße durchgeführt. Die Klimawirkungsanalyse untersucht klimatische Einflüsse und Gefährdungspotenziale klimainduzierter Naturgefahren auf Basis von Klimaprojektionen, Gefahrenhinweiskarten und weiteren Datengrundlagen für die Zukunft bis 2100. Ferner werden Methoden und Modellwerkzeuge erarbeitet, die dann teilweise in dauerhafte Klimaberatungsdienste übergehen (zum Beispiel DAS-Basisdienst "Klima und Wasser", PROWaS)
1.10	Fortführung des Nationalen Hochwasserschutzprogramms	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen; Finanzielle Ressourcen	Das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) dient dazu, den steigenden Risiken von Hochwasserereignissen koordiniert und länderübergreifend zu begegnen. Das NHWSP wird dabei als Ergänzung der umfassenden Hochwasserrisikomanagementplanung nach EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) gesehen. Das NHWSP stellt Maßnahmen zur Verbesserung des vorsorgenden Hochwasserschutzes in den Fokus. Die kontinuierliche Fortführung des NHWSP ist für überregional wirkende Maßnahmen des gesteuerten Hochwasserrückhalts, der Deichrückverlegung und der Schwachstellenbeseitigung an bestehenden Anlagen erforderlich, die sich auf Ober- und Unterlieger beziehen. In Hinblick auf den Klimawandel bekommt der länderübergreifende Schutz vor Extremhochwasserereignissen neue Priorität und erfordert eine Fortführung des NHWSP.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
1.29	Grundlagenermittlung für den systematischen und strukturierten Umgang von Bund und Ländern mit Niedrigwasser und Trockenheit	Wissen	Mangelnde Niederschläge können zu Niedrigwassersituationen bei Fließgewässern, aber auch zu sinkenden Grundwasserspiegeln führen, die Auswirkungen auf viele Handlungsfelder und Sektoren entfalten (zum Beispiel Transport über die Wasserstraßen, Kraftwerkskühlung, Wasserversorgung, Gewässerökologie) und zu signifikanten ökonomischen und ökologischen Schäden führen können. Klimaprojektionen legen nahe, dass die Häufigkeit von Dürreperioden zunehmen könnte. Daher erscheint es notwendig, die Risiken, die mit zunehmenden Niedrigwasserereignissen einhergehen, länderübergreifend zu analysieren und damit die Grundlagen für einen systematischen, sektorübergreifenden und Synergien-nutzenden Umgang mit diesen Risiken zu entwickeln.
1.31	Bundesraumordnungsplan Hochwasser	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	

Zur systematischen Berücksichtigung des Klimawandels bei der Maßnahmenplanung wird für alle Bundeswasserstraßen ein Climate Proofing durchgeführt (APA III: 2.5 – 2.18), welches die Integration der Analyse von Klimawandelfolgen und Erfordernissen zur Anpassung auf verschiedenen Handlungsebenen als eine der Grundlagen der Planungsprozesse der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes etabliert (WSV 2019; Norpoth et al. 2020).

Die aufgeführten Anpassungsmaßnahmen und -instrumente decken insbesondere die Anpassungsdimensionen „Wissen“, „Technologie und natürliche Ressourcen“ und „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ ab. Der Aktionsplan Niedrigwasser des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur mit acht Maßnahmen adressiert zusätzlich durch die Maßnahme „Gesellschaftlicher Dialog“ die Dimension „Motivation und Akzeptanz“.

Weiterreichende Anpassung

Weiterreichende Anpassungsmaßnahmen und -instrumente zur Reduktion der Beeinträchtigung des inländischen Warentransports auf Bundeswasserstraßen können im operativen und regulativen Bereich ansetzen. Speziell die Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen, wie beispielsweise bestehender Normen, kann dabei als ein Instrument zur Initiierung unternehmerischer Anpassungsprozesse dienen (Norpoth et al. 2020). Zudem scheint eine Kombination verschiedener Anpassungsmaßnahmen empfehlenswert (Rothstein und Scholten 2014; Norpoth et al. 2020). Neben den in Tabelle 18 aufgeführten Möglichkeiten ergeben sich insbesondere bezogen auf niedrigwasserbedingte Beeinträchtigungen des Warenverkehrs noch weitere Anpassungsmaßnahmen, die in der Betrachtung der Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ausgeführt werden.

Tabelle 18: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene ¹³	Charakteristika
Optimierung der Verlagerung auf andere Verkehrsträger (WSV 2007; Scholten 2010; Norpoth et al. 2020)	Technologie und natürliche Ressourcen	Operationelle Maßnahme zur Gewährleistung des Warentransports und Reduktion von Lieferengpässen während Niedrigwasser- oder Hochwasserereignissen (zum Beispiel Stresstest Mittelrhein)	Verladende Industrie; Unternehmen; Betreiber der Verkehrsträger	Abhängig von der vorhandenen Infrastruktur (Rothstein und Scholten 2014)
Vermehrtes Leichten (Abladen von Transportgütern) (BLfU 2017)	Technologie und natürliche Ressourcen	Kurzfristiges Abladen von Gütern zur Ermöglichung der Weiterfahrt mit geringerer Beladungsmenge	Schiffseigentümer; Hafenbetreiber	Kurzfristige Maßnahme; Erfordert entsprechende Lagerungs- und Umschlagskapazitäten der Häfen (BLfU 2017)
Anpassung der Wasserbewirtschaftung (Kofalk et al. 2014; LAWA 2017)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Optimierung des Schiffbetriebes	Bund; Bundesländer; Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung und -ämter	Mögliche Zielkonflikte mit Maßnahmen des Naturschutzes
Anpassung der Unternehmenslogistik und Lagerhaltung (WSV 2007; Scholten et al. 2014; Nilson et al. 2014; BfG et al. 2015)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Erhöhte Lagerkapazitäten zur Gewährung der Versorgungssicherheit während Lieferengpässen (Scholten et al. 2014; Rothstein und Scholten 2016)	Unternehmen; Kommunalplaner	Starke Variation in der Auslastung der Lagerkapazitäten möglich (Rothstein und Scholten 2014)

Ob die genannten Maßnahmen zum Einsatz kommen oder nicht, hängt unter anderem mit Aspekten der Wirtschaftlichkeit zusammen. Ferner ist es entscheidend inwiefern Interessen anderer Akteure im System Wasserstraße behindert oder der Natur- und Gewässerschutz in einem nicht vertretbaren Maße negativ beeinflusst wird (Stölzle et al. 2018).

Zudem können räumliche Grenzen bei der Erweiterung der Lagerkapazitäten auftreten, wenn benötigte Flächen nicht ausreichend verfügbar sind. Weiterhin können finanzielle und rechtliche Hindernisse zum Beispiel bei der Umsetzung einer angepassten Lagerhaltung und/oder Umstellung der Lagerlogistik existieren (Scholten et al. 2014).

¹³ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 19: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	Ausweisung von zusätzlichen Flächen für Erweiterungen der Lagerkapazitäten
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	<ul style="list-style-type: none"> - Erkenntnisse der Organisationen des Bevölkerungs- und Katastrophenschutzes über Vulnerabilitäten der Bundeswasserstraßen können zur Vermeidung von Lieferengpässen bei Niedrigwassersituationen beitragen. - Beispiele aus Studien zu kritischen Infrastrukturen können helfen, um die Aus- und Überlastung von Bundeswasserstraßen in Extremwetterlagen besser zu bestimmen.

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk hat im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken die Anpassungsdauer von Maßnahmen an die Beeinträchtigung des Warenverkehrs auf Wasserstraßen mit einer Zeitspanne von bis zu 50 Jahren bewertet. Maßnahmen in Bezug auf die Unternehmenslogistik und Lagerhaltung, der Anpassung der Wasserbewirtschaftung sowie des Leichterns können auch schon in kürzeren Zeitspannen wirksam werden.

Tabelle 20: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Anpassung der Unternehmenslogistik und Lagerhaltung - Anpassung der Wasserbewirtschaftung - Leichtern
10-50 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Flussbauliche Maßnahmen - Optimierung der Verlagerung auf andere Verkehrsträger

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Ansatzpunkte zu systemüberschreitenden, transformativen Anpassungsmöglichkeiten bieten sich beim Warenverkehr über Bundeswasserstraßen insbesondere durch umfassende Verkehrskonzepte zur intensiven Verzahnung von Verkehrsträgern. Über die flächendeckende Ermöglichung von kombiniertem Verkehr per Schiff oder Schiene und dem Einsatz von innovativen Technologien und Systemen zur Verladung können Lieferverfügbarkeiten optimiert und so mögliche klimawandelbedingte Verzögerungen verringert werden (BDB et al. 2020).

Eine extreme Beeinträchtigung des Warenverkehrs, welche das Herunterfahren der Produktion erzwingt, könnte eine langfristige Verlagerung von Produktionsstandorten nach sich ziehen (Scholten 2010; Rothstein und Scholten 2014).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 21: „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III) ¹⁴			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	mittel	mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
Gewissheit	hoch	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie aus der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Motivation und Akzeptanz“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zu leisten.

Tabelle 22: „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	3	4	4-5	3-4	2-3	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

2.2.6 Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs (Inland)

Hintergrund und Stand der Forschung

Funktionierende landgestützte Verkehrssysteme sind für Unternehmen eine wichtige Voraussetzung für die Warenversorgung und den Transport von Produkten (BMVI 2014). Der landgestützte Warenverkehr in Deutschland erfolgt über die Verkehrsträger Straße (Gütertransport durch LKWs) und Schiene (Gütertransport durch Eisenbahnen) (Schubert et al. 2014). Im Jahr

¹⁴ Die hier für das Bundesgebiet und für das gesamte Maßnahmenpaket der beschlossenen Maßnahmen vorgenommene Einschätzung kann die spezifischen Charakteristika der einzelnen Wasserstraßengebiete nur unzureichend abbilden. Die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Wasserstraßen und deren verkehrliche Rahmenbedingungen sind teils sehr unterschiedlich. Daher können die aufgeführten beschlossenen Maßnahmen je nach Bundeswasserstraße auch eine unterschiedliche Wirksamkeit entfalten. Dies gilt insbesondere für den Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“, der eine hohe Wirksamkeit aufweist, sich jedoch größtenteils auf den Rhein bezieht. In der aggregierten Betrachtung der Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen für alle Wasserstraßen ergibt sich daher eine mittlere Wirksamkeit (siehe auch „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“).

2017 wurden 78 Prozent der in Deutschland transportierten Güter über die Straße und neun Prozent über die Schiene befördert (Destatis 2019a). Der Straßengüterverkehr transportiert in hohen Mengen Erze, Steine und Erden, chemische Erzeugnisse sowie Konsumgüter (Schubert et al. 2014; Hütter 2016). Der Schienengüterverkehr befördert insbesondere Metalle und Metallerzeugnisse, Erze, Steine und Erden, Kokerei- und Mineralölzeugnisse sowie chemische Erzeugnisse. Bis 2030 wird eine Zunahme der Transportleistung im deutschen Straßengüterverkehr um 38,9 Prozent und im Schienengüterverkehr um 42,9 Prozent im Vergleich zu 2010 erwartet (Schubert et al. 2014; BMVI 2016a).

Der landgestützte Verkehr in Deutschland ist verschiedenen klimatischen Einflüssen und insbesondere den Folgen extremer Wetterereignisse ausgesetzt (Bräuer et al. 2009; Auerbach et al. 2014). Die Folgen dieser Ereignisse können sich auf den inländischen Warentransport auswirken (BMVI 2014). Vorgelagerte Klimawirkungen, welche den landgestützten Warenverkehr beeinflussen, sind unter anderem Schäden und Hindernisse auf Straßen und Schienenwegen durch Hochwasser und durch gravitative Massenbewegungen (siehe Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“).

Verschiedene Forschungsvorhaben behandeln spezifische klimatische Einflüsse und deren Folgen für den landgestützten Verkehr. Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks werden die Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen und Hochwasser auf den Straßen- und Schienenverkehr untersucht (Lohrengel et al. 2020). Für den Schienengüterverkehr erstellte das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung eine Risikoabschätzung am Beispiel Flusshochwasser (Schönfelder et al. 2018).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Auswirkungen von extremen Wetterereignissen wie Stürmen und dadurch bedingte Windbrüche, Hitzewellen und Starkniederschlägen können in Zukunft zu Beeinträchtigungen des Straßen- und Schienengüterverkehrs führen (Bräuer et al. 2009; Auerbach und Hermann 2014; Groth et al. 2014; Peter et al. 2019a).

Die Überhitzung von Fahrzeuginnenräumen über längere Zeiträume durch einen Anstieg an heißen Tagen kann die Beförderung von Gütern erschweren (Ott und Richter 2008) (siehe 2.2.4). Weiterhin besteht die Gefahr, dass sich Straßenbeläge und Brückenverbindungen aufgrund großer Hitze verformen (UBA 2011). Verbesserte Abläufe im Warentransport können dagegen zukünftig durch schneeärmere Winter auftreten, da weniger Straßen geräumt werden müssen und Frostschäden an Fahrzeugen seltener auftreten (Enei et al. 2010; Peter et al. 2019a). Starke Temperaturschwankungen tragen auch im Schienenverkehr zu einer Verformung der Schienen bei (Nies und Apfel 2011; UBA 2011). Geschwindigkeitsrestriktionen durch beschädigte Schieneninfrastruktur haben längere Liefer- und Transportzeiten im Warentransport zur Folge (Bräuer et al. 2009).

Durch unter anderem zunehmende Starkniederschläge oder Frost-Tau-Wechsel ausgelöste gravitative Massenbewegungen können Straßenabschnitte zeitweilig unbefahrbar machen (Enei et al. 2010; Lohrengel et al. 2020). Von einem hohen Überschwemmungsrisiko können speziell Küstenabschnitte und Straßenabschnitte, welche nah an überflutungsgefährdeten Flüssen liegen, betroffen sein. Diese müssen, je nach Ausmaß der Überschwemmung, zeitweise für den Straßenverkehr gesperrt werden (Hänsel et al. 2020). Eine erhöhte Anzahl an Hochwasserereignissen kann im Schienenverkehr zur Beschädigung der Schienennetze durch Überschwemmungen führen (Lindgren et al. 2009; Hänsel et al. 2020).

Der Schienenverkehr wird schon heute durch extreme Wetterereignisse wie Stürme und dadurch bedingten Windbruch beeinträchtigt (Groth et al. 2014; Bott et al. 2020). Entstehende

Oberleitungsschäden durch Stürme führen zu sofortigen Unterbrechungen auf der betreffenden Schienenstrecke (Pechan et al. 2011; Bott et al. 2020). Bei der Projektion von Windfeldern, die Hinweise auf die zukünftige Sturmentwicklung geben, wurden bisher noch keine relevanten Änderungstendenzen festgestellt (Pinto und Reyers 2017; Bott et al. 2020). Neben Stürmen kann eine mögliche Zunahme an Gewittern und Blitzeinschlägen elektronische Infrastrukturen beschädigen und das Risiko für Signalstörungen erhöhen (UBA 2011).

Die Auswirkungen der genannten klimatischen Einflüsse führen zu Behinderungen im Straßen- und Schienenverkehr und zu Einschränkungen beim Transport von Gütern. Sie können sich daher negativ auf Lieferprozesse von Unternehmen auswirken, insbesondere mit Blick auf „just-in-time“-Lieferungen (Hirschfeld et al. 2016; Hänsel et al. 2018). Trotz der genannten klimatischen Einflüsse wird vermutet, dass die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf den deutschen Warentransport per Zug und LKW nur zu kurzfristigen Unterbrechungen führen und somit eher geringe bis mittlere ökonomischen Risiken erwartet werden können (Peter et al. 2019a).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 23: „Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs (Inland)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs (Inland)“

- ▶ In Zukunft kann durch eine Zunahme an Starkniederschlägen und Heißen Tagen mit Beeinträchtigungen von Lieferprozessen auf Straßen und Schienen gerechnet werden, die in der Regel zu kurzen Unterbrechungen der Transportinfrastruktur führen können.
- ▶ Es wird erwartet, dass die wirtschaftlichen Auswirkungen dieser Einschränkungen des landgestützten Warenverkehrs gering bleiben werden.

2.2.7 Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung

Hintergrund und Stand der Forschung

Industriebetriebe in Deutschland sind für fast die Hälfte des Energieverbrauchs verantwortlich, gefolgt von der Dienstleistungsbranche und der Landwirtschaft (Weimer-Jehle et al. 2015; BDEW 2019). Insgesamt ist der Stromabsatz in Deutschland laut dem Statistischen Bundesamt seit dem Jahr 1991 von 418.617 auf 520.706 Gigawattstunden im Jahr 2008 gewachsen und seitdem bis zum Jahr 2017 auf 444.591 Gigawattstunden gesunken (Destatis 2020). Der Endenergieverbrauch der Industrie wurde 2017 zu großen Teilen von den Energieträgern Erdgas und Strom abgedeckt (UBA 2017). Die Energiepreise für die Industrie sind in den letzten zehn Jahren gestiegen. Dies ist unter anderem durch Steuern, Abgaben und Umlagen wie beispielsweise die Umlage des Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) bedingt (BDEW 2019; BMWi 2019d). Stromintensive Unternehmen können nach der besonderen Ausgleichsregelung des EEG-Gesetzes eine Begrenzung der EEG-Umlage beantragen (BAFA 2019). Eine hohe Energieintensität besitzen

Branchen des verarbeitenden Gewerbes wie die Chemie- und Pharmaindustrie, die Metallherstellung und -bearbeitung, das Glasgewerbe und das Papier- und Druckgewerbe (BMWi 2019b; Destatis 2019c).

Bei der Energieversorgung steht für die Industrie die unterbrechungsfreie Versorgung im Mittelpunkt, die von einem funktionierenden Energietransport abhängig ist (Lindenberger et al. 2008; Albrecht et al. 2011; Bieritz 2015). Besonders die mit der Umstellung auf erneuerbare Energien einhergehenden Energiefluktuationen können die Energieversorgung für industrielle Prozesse beeinträchtigen (Albrecht et al. 2011; O'Sullivan et al. 2019). Unterbrechungen der Energieversorgung können außerdem zu Produktionsausfällen, Datenverlusten und direkten Schäden an Anlagen führen (Albrecht et al. 2011; Groth und Cortekar 2015). Stromausfälle können daher unter Umständen hohe finanzielle Folgen haben (Lühr et al. 2011a). Auch unvorhergesehene Änderungen des Energiepreises können die energieintensive Branchen stark beeinträchtigen (Heymann 2007). Wird die Energieversorgung unterbrochen, kann dies auch die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie insgesamt beeinflussen (Lutz und Breitschopf 2016).

Im europäischen Vergleich ist Deutschland dank seines engmaschigen Stromnetzes eines der Länder mit den wenigsten Stromunterbrechungen und damit der höchsten Versorgungsqualität (BDEW 2019). In den letzten Jahren traten zeitweilige Versorgungsunterbrechungen besonders durch die Auswirkungen von Starkwinden auf. So haben Orkane wie Xavier und Herwart zu Ausfällen der Stromversorgung von insgesamt bis zu 22 Minuten im Jahr 2017 geführt, während beispielsweise in 2016 die kumulierte Unterbrechungsdauer der Stromversorgung nur 12 Minuten betrug (UBA 2019b).

Der Energieverbrauch von Unternehmen wird neben produktionsbezogenen Faktoren auch von externen Aspekten beeinflusst. So kann sich der Bedarf an Kühlenergie zur Prozesskühlung bei steigenden Temperaturen erhöhen. Zur Schaffung eines angenehmen Innenraumklimas in Bürogebäuden kann bei hohen Temperaturen auch bei der Raumkühlung mit einem höheren Energiebedarf gerechnet werden.

Betrachtet man die klimatischen Einflüsse auf die Energieversorgung, so bleiben unterirdisch verlaufende Verteilnetze größtenteils unbeeinträchtigt (Groth und Cortekar 2015). Oberirdische Übertragungsnetze sind hingegen extremen Wetterereignissen wie Stürmen, Unwettern und Starkniederschlägen direkt ausgesetzt und können daher durch solche Ereignisse beschädigt werden (Keller und Atzl 2014; Groth und Cortekar 2015). Dies kann bei starker Beschädigung zeitweise auch zu Unterbrechungen der Stromversorgung führen. Neben Schäden an der Transportinfrastruktur ist auch eine Beeinträchtigung der Energieversorgung bei Kühlwassermangel von thermischen Kraftwerken aufgrund von Niedrigwasserständen der Bundeswasserstraßen möglich (siehe „Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung des Energieverbrauchs und der Versorgungssicherheit sind zwei Trends im Energiesektor besonders ausschlaggebend: der weiter steigende Ausbau erneuerbarer Energien und die Ausrichtung hin zu verstärkten Energieeinsparungen (O'Sullivan et al. 2019). Die damit einhergehende abnehmende Nutzung fossiler Brennstoffe verringert die Abhängigkeit von diesen und damit die Beeinträchtigungen der Energieversorgung durch Energiepreisfluktuationen auf dem internationalen Energiemarkt (Albrecht et al. 2011; EEA 2017b). Andererseits bringt der Umstieg auf erneuerbare Energien ein erhöhtes Risiko für Fluktuationen in der Energieversorgung mit sich.

Extremwetterereignisse können zu kurzfristigen Anstiegen der Strompreise führen (Dunkelberg et al. 2009). Bei einer Zunahme von Starkniederschlägen und Hitzewellen besteht die Möglichkeit, dass Unternehmen aller Sektoren in Zukunft von höheren Energiekosten betroffen sein können. Dies kann besonders energieintensive Branchen wie die Chemie-, Metall-, Baustoff- und Papierindustrie beeinträchtigen (Heymann 2007). Die Beschädigung von Leitungsnetzen und Kraftwerken als Folge von zunehmenden Extremwetterereignissen wie Starkniederschlägen und Hitzewellen kann zukünftig verstärkt Energieversorgungsengpässe nach sich ziehen. Diese können zusätzlich durch eine mögliche Beeinträchtigung der Verfügbarkeit von Primärenergieträgern im Zuge der Folgen des Klimawandels verschärft werden (Lutz und Breitschopf 2016). Zudem werden thermische Kraftwerke, neben anderen Stromerzeugungsanlagen, als Folge des Klimawandels stärker von Kühlwassermangel betroffen sein, wodurch bis zum erfolgten Umstieg auf erneuerbare Energien ebenfalls Einschränkungen in der Energieversorgung auftreten können (Koch et al. 2014a). Gleichzeitig wird der Bedarf an Kühlenergie für industrielle Prozesse und für Raumklimatisierung aufgrund steigender Temperaturen voraussichtlich zunehmen, was insbesondere während Hitzewellen zu einer erhöhten Energienachfrage führen kann (siehe „Bedarf an Kühlenergie“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“). Dadurch wären besonders Unternehmen mit hohem Kühlenergiebedarf in ihren Produktionsprozessen beeinträchtigt.

Der Atomausstieg bis 2022 und die voraussichtliche Einstellung der Braun- und Steinkohleerzeugung bis 2038 tragen zur Komplexität bei, da diese parallel zur Energiewende stattfinden und die durch diese Stromerzeugungsformen gewährleistete Stabilität in der Versorgung bisher nur bedingt durch erneuerbare Energien aufgefangen werden kann (Förster und Lilliestam 2010; Linnerud et al. 2011; Rübhelke und Vögele 2011). Eine dadurch bedingte Zunahme an Beeinträchtigungen in der Energieversorgung sollte jedoch mit dem Ausbau des Energienetzes im Rahmen der Energiewende bis spätestens 2038 abgeschlossen sein.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 24: „Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	gering	gering	gering
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung“

- ▶ Die Energieversorgung deutscher Unternehmen kann auch in Zukunft als weitgehend stabil angesehen werden. Unsicherheiten ergeben sich durch den geplanten Netzausbau im Rahmen der Energiewende, welcher zu einer erhöhten Störanfälligkeit des Netzes führen kann.
- ▶ Besonders für energieintensive Branchen können in Zukunft zunehmende Schwankungen des Strompreises, ausgelöst durch extreme Wetterereignisse wie Hitzeperioden und Starkniederschläge, zu höheren Energiekosten führen. Diese Preissteigerungen können ein Auslöser für Energieeinsparungen sein.
- ▶ Ein durch die Temperaturzunahme bedingter Anstieg an Kühlenergiebedarf kann den Energieverbrauch von Unternehmen erhöhen.

2.2.8 Wasserbedarf

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Wasserbedarf wird ein Planungswert für die voraussichtlich benötigte Wassermenge bezeichnet, welche für eine ausreichende zukünftige Wasserversorgung bereitzustellen ist (Fritsch et al. 2014). Im Folgenden wird der Wasserbedarf in Industrie und im verarbeitenden Gewerbe betrachtet. Der Einfluss industrieller und gewerblicher Wassernutzung auf Gewässer und die möglichen Einschränkungen der Wasserverfügbarkeit bei klimawandelbedingten Veränderungen sind Teil der Klimawirkung „Produktionswasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Die Auswirkungen von klimawandelbedingter Kühlwasserknappheit bei thermischen Kraftwerken werden in der Klimawirkung „Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ betrachtet.

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland insgesamt circa 24,4 Milliarden Kubikmeter Wasser gefördert, davon circa 19,2 Milliarden Kubikmeter für die nichtöffentliche Wasserversorgung, also für das verarbeitende Gewerbe, Bergbau, Landwirtschaft, Energieversorgung und andere Dienstleistungsbereiche (Destatis 2018c). Flüsse, Seen und Talsperren stellten die mit Abstand größte Quelle der nichtöffentlichen Wasserversorgung dar (15,1 Milliarden Kubikmeter), aus dem Grundwasser stammten knapp 2,3 Milliarden Kubikmeter. Das restliche Wasser wurde aus Meer- und Brackwasser, Uferfiltrat, angereichertem Grundwasser und Quellwasser gewonnen.

62,2 Prozent des Wassers der nichtöffentlichen Versorgung wurde 2016 für die Energieversorgung verwendet (12,7 Milliarden Kubikmeter), das verarbeitende Gewerbe verwendete knapp 28 Prozent (5,6 Milliarden Kubikmeter), die Bergbauindustrie knapp 6,9 Prozent (circa 1,4 Milliarden Kubikmeter). Knapp 18,2 Milliarden Kubikmeter Frischwasser wurden 2016 für Kühlung (16,6 Milliarden Kubikmeter) sowie Produktions- und sonstige Zwecke, zum Beispiel Dampferzeugung und Staubbindung, (1,6 Milliarden Kubikmeter) eingesetzt (Destatis 2019b). Im verarbeitenden Gewerbe trug die Chemieindustrie 2016 über 55 Prozent zur Gesamtwassernutzung bei (Destatis 2019b). Sowohl für die Chemie- als auch die Pharmaindustrie wird besonders sauberes Wasser benötigt (Nies und Apfel 2011). Andere wasserintensive Gewerbezweige sind die Metallindustrie sowie das Papier-, Verlags- und Druckgewerbe (Auerswald und Vogt 2010; Destatis 2019b).

Während Kühlwasser in der Regel nach der Nutzung direkt in Gewässer (zurück-)geleitet werden kann, entsteht in Produktionsprozessen Abwasser, welches vor einer Einleitung aufbereitet werden muss (Bender et al. 2017). Die Wasserverluste im Produktionsprozess (ohne Beregnung oder Bewässerung) betragen 2016 knapp 914 Millionen Kubikmeter. Ein Großteil davon verdunstete im Nutzungsprozess (756 Millionen Kubikmeter), ein kleinerer Teil ging in Produkte ein (158 Millionen Kubikmeter) oder wurde für andere Zwecke verwendet (96 Millionen Kubikmeter), zum Beispiel für sanitäre Einrichtungen, Reinigungszwecke, Kantinen.

Die Wasserentnahmen in Deutschland sowohl in der gewerblichen wie auch in der privaten Nutzung sind zwischen 1991 und 2016 deutlich zurückgegangen (UBA 2019b). Allein zwischen 2013 und 2016 sank die nichtöffentliche Wassernutzung um 4,7 Prozent (Destatis 2018c). Der Trend zu mehr Umweltschutz, erneuerbaren Energien mit geringerem Kühlwasserbedarf sowie Aufbereitung und Rückgewinnung von Wasser hilft dabei, den Wasserbedarf von Industrie und Gewerbe zu reduzieren (Ante et al. 2014). Allerdings lässt sich Wasser nicht immer substituieren, da dieses nicht nur für Produktionsabläufe benötigt wird, sondern besonders in der Lebensmittel-, Chemie- und Pharmaindustrie häufig auch ein direkter Bestandteil von Produkten ist (Groth und Rose 2018).

Bei Trockenperioden steigt der Wasserbedarf, während die Verfügbarkeit von Wasser abnimmt (Bender et al. 2017). In den Sommermonaten verzeichnet die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie einen erhöhten Wasserbedarf aufgrund einer starken Nachfrage wasserhaltiger Produkte seitens der Verbraucher und Verbraucherinnen (Groth und Rose 2018). Diese Nachfragespitzen könnten mit steigenden Temperaturen weiter zunehmen oder sich zeitlich ausweiten.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Der Wasserbedarf von Industrie und Gewerbe in Deutschland wird von einem Zusammenspiel fortschreitender technologischer Lösungen und Verringerungen im Wasserbedarf auf der einen, und einer zunehmenden Trockenheit und geringerem Wasseraufkommen auf der anderen Seite bestimmt (Nilson et al. 2014; Storch et al. 2018).

Aufgrund zunehmender anhaltender Hitzeperioden ist mit einem Trend hin zu größeren saisonalen Schwankungen und einer steigenden Variabilität des Wasserbedarfs zu rechnen (Rohn und Mälzer 2010; Groth und Rose 2018; Storch et al. 2018). Gleichzeitig wird erwartet, dass sich der industrielle Wasserbedarf in Zukunft weiter reduzieren könnte (Deutscher Bundestag 2018). Dies könnte durch einen flächendeckenden Einsatz von produktionsintegriertem Abwasserrecycling sowie weiteren Effizienzsteigerungen bei Kühlsystemen bewerkstelligt werden. Zudem ist davon auszugehen, dass der Bedarf an Kühlwasser durch thermische Kraftwerke in Zukunft weiter abnimmt und spätestens für das Ende des Jahrhunderts nur noch eine geringe Anzahl an Kraftwerken Kühlwasser benötigen (siehe „Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“).

Allerdings lassen sich nicht alle gewerblichen Nutzungsarten von Wasser reduzieren. So könnten oben erwähnte hitzebedingte Nachfragespitzen den Wasserbedarf in den entsprechenden Unternehmen insbesondere in Zeiten geringerer Wasserverfügbarkeit erhöhen.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 25: „Wasserbedarf“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Wasserbedarf“

- ▶ Klimawandelbedingt zunehmende Hitze kann zu größeren saisonalen Schwankungen und einer steigenden Variabilität des Wasserbedarfs führen.
- ▶ Der Wasserbedarf in Industrie und Gewerbe könnte in Zukunft durch flächendeckendes Abwasserrecycling und effizientere Kühlsysteme sinken.
- ▶ Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf an Kühlwasser für thermische Kraftwerke, der derzeit einen bedeutenden Anteil des Wasserbedarfs ausmacht, infolge der Energiewende in Zukunft weiter abnimmt.
- ▶ In einigen Branchen mit wasserhaltigen Produkten, wie der Nahrungsmittel- und Getränkeproduktion, könnten steigende Temperaturen zu einem erhöhten Wasserbedarf führen, der nicht durch Effizienzsteigerungen substituierbar sind.

2.2.9 Freisetzung gefährlicher Stoffe

Hintergrund und Stand der Forschung

Als gefährliche Stoffe gelten laut § 3 Absatz 9 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) Stoffe oder Gemische, die unter der Europäischen Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (Verordnung 1272/2008; CLP-VO) als Stoffe mit gefährlichen Eigenschaften wie beispielsweise entzündbar, toxisch, karzinogen, akut oder langfristig gewässergefährdend einzustufen sind (BImSchG 2013). Dabei handelt es sich zum Beispiel um Schwermetalle, Biphenyl, Ethanol oder Benzen (Kalberlah et al. 2011). Unter Freisetzung wird im Folgenden die nicht bestimmungsgemäße, unbeabsichtigte Freisetzung von gefährlichen Stoffen verstanden.

Durch Freisetzungen mit der Folge von Luft- oder Bodenverunreinigung oder der Kontamination von Wasser und Nahrungsmitteln können gefährliche Stoffe Ökosysteme bedrohen, in Kontakt mit der Bevölkerung gelangen und zur Erhöhung von Krankheitsrisiken beitragen (EEA 2018). Schon kleine Veränderungen in der Konzentration gefährlicher Stoffe können einen erheblichen Einfluss auf Gesundheit und Lebenserwartung haben (Ogwu et al. 2015). Weiter können bestimmte gefährliche Stoffe Explosionen oder Brände auslösen, die nicht nur direkt Schäden verursachen, sondern auch Verbrennungsprodukte freisetzen, die ebenfalls gefährliche Stoffe, und unter Umständen weit toxischer als die Ausgangsstoffe, sein können.

Das Risiko der Freisetzung gefährlicher Stoffe stellt seit dem Beginn der Industrialisierung eine ständige Gefahr dar (Bölscher et al. 2017). In der jüngeren Vergangenheit hat sich besonders die Vielfalt und Menge von synthetischen Chemikalien in Produktionsprozessen stark erhöht, was parallel zu einem Anstieg des Risikos einer Freisetzung gefährlicher Stoffe geführt hat (EEA 2018).

Der Austritt gefährlicher Stoffe durch Hochwasser oder Überflutungen, durch Ausfälle von Kühlvorrichtungen oder Engpässe in der (Kühl-)Wasserversorgung zählen zu den relevanten Ursachen für die Freisetzung gefährlicher Stoffe. Dabei führen besonders Blitzeinschläge, Hochwasser, Starkniederschläge, Überflutungen, niedrige Temperaturen und Stürme zu Störfällen und Unfällen, beispielsweise in Chemie- und Kläranlagen, bei denen ein hohes Risiko zur Freisetzung gefährlicher Stoffe, von Bränden oder Explosionen besteht (Köppke und Sterger 2013). Dies trifft auch auf Verbraucher-Öltanks, die beim Aufschwimmen oder Ausspülen Öle freisetzen, und insbesondere auf Abfalldeponien zu, wo es nach Überflutungen zu einer besonders starken Ausbreitung gefährlicher Stoffe kommen kann (Kuehni et al. 2018).

Bei See- oder Binnenwasserstraßen können Sturmfluten oder Hochwasserereignisse Sedimente – als vorübergehende Speicher für Schadstoffe – aus Mulden oder strömungsarmen Bereichen in den weiteren Verlauf der See- und Binnenwasserstraßen spülen. Deren Verlandung an anderen Flachwasserbereichen kann negative Folgen für das umliegende Ökosystem haben (Düring 2012; Pohlert et al. 2012).

Die Freisetzung gefährlicher Stoffe birgt zukünftig auch größere Risiken in Verbindung mit der Trinkwasserversorgung und der Abwasserentsorgung. Nahezu die gesamte Bevölkerung Deutschlands ist an Trinkwasserversorgungs- und Abwasserentsorgungs-Systeme angeschlossen (Sartorius et al. 2019). Dadurch ist zwar zunächst eine hohe Servicequalität für die Versorgung mit beziehungsweise die Entsorgung von Trink- und Abwasser sichergestellt, allerdings besteht bereits heute die Gefahr, dass gefährliche Stoffe extremwetterbedingt, zum Beispiel durch Starkniederschläge und Hochwasserereignisse, entweder in die Systeme eindringen oder aus ihnen austreten (Deutscher Bundestag 2016). Somit kann die Trinkwasserversorgung durch

die Freisetzung gefährlicher Stoffe im Oberflächen- und Grundwasser bedroht sein, insbesondere wenn die Reaktionsfähigkeit der Stoffe durch erhöhte Temperaturen begünstigt wird (Rohn und Mälzer 2010; Hillenbrand et al. 2019).

Im Forschungsvorhaben KLIWAS wurde die Sedimentdynamik in See- und Binnenwasserstraßen und die damit verbundene potenzielle Verteilung von Schadstoffen für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts untersucht (BfG et al. 2015). Die Ergebnisse zeigen für das Ende des Jahrhunderts Phasen von anhaltendem Oberwasserzufluss an der Elbe auf, welche zu zunehmenden Ablagerungen von schadstoffbehafteten Sedimenten in Flachwasserbereichen führen können.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Im Zuge des Klimawandels wird ein zunehmendes Auftreten von extremen Wetterereignissen wie Hitzeperioden und Starkniederschlägen erwartet. Hitzeperioden in Verbindung mit Trockenheit können zur Konzentration gefährlicher Stoffe in Gewässern führen. Zudem können bei Hitzeperioden Anlagenteile aufgeheizt werden. Sind darin thermisch sensible Stoffe enthalten, besteht die Möglichkeit, dass diese zu reagieren beginnen und Stofffreisetzungen, Brände oder Explosionen auslösen (EEA 2018).

Hochwasser oder durch Starkniederschläge verursachte Überflutungen, Überlastungen von Entwässerungssystemen und Treibgut können zur Beschädigung oder Ausspülung von Anlagenteilen mit gefährlichen Stoffen und damit zur Freisetzung und Ausbreitung gefährlicher Stoffe beitragen. In bebauten Gebieten können Starkniederschläge die Durchflusskapazität der Kanalisationen überlasten, selbst wenn Entlastungsbecken existieren. In der Folge kann bei Mischkanalisationen unbehandeltes Abwasser nicht eintreten oder sogar austreten und in natürliche Gewässer gelangen (Tröltzsch et al. 2012). Die projizierte Zunahme von Starkniederschlägen erhöht die Wahrscheinlichkeit für Überflutungen und Hochwasser (Köppke und Sterger 2013; Deutscher Bundestag 2016). Hiervon betroffen sind insbesondere Chemie- und Kläranlagen in Überflutungsgebieten. Eine erhöhte Belastung von Klärwerken ist besonders in den Einzugsgebieten der Elbe, Weser und Donau zu erwarten, unter Annahme einer pessimistischen Klimawandelprojektion auch in den Einzugsgebieten des Rheins (BfG 2013). Der Anstieg des Meeresspiegels und erwartete höhere Scheitelwasserstände bei Sturmfluten können besonders für Anlagen nahe der Küste - regional abhängig von existierenden Küstenschutzmaßnahmen - das Risiko von Überflutungen erhöhen.

Städte werden zudem durch die vergleichsweise hohe Freisetzung von Kohlendioxid und weiteren Treibhausgasen belastet, was zur Bildung von bodennahem Ozon führen kann (Onyanta 2016). Bei gleichzeitig hohen Temperaturen und starker Sonneneinstrahlung, wie bei einer zunehmenden Anzahl an heißen Tagen zu erwarten, kann bodennahes Ozon entstehen und gesundheitsgefährdende Wirkungen entfalten und beispielsweise zu Atemwegs- und Herz-Kreislauferkrankungen führen (Eis et al. 2010; WHO 2018; Berger et al. 2019) (siehe 4.2.6).

Darüber hinaus können sinkende Grundwasserspiegel, besonders in Kombination mit Starkwinden, zur Belüftung tieferliegender geologischer Schichten führen, wodurch darin abgelagerte Eisensulfide oxidieren und Schwefelsäure bilden können (Graaf et al. 2015). Dies tritt vor allem in Berg- und Tagebaugebieten auf. Es besteht das Risiko, dass durch eine erneute Bewässerung betroffener Gebiete gefährliche Stoffe in das Grundwasser eindringen und bislang unbelastete Regionen erreichen (Peckenham et al. 2009; Graaf et al. 2015). Dieser Prozess wird durch erhöhte Wassertemperaturen begünstigt, da die Geschwindigkeit der zugrundeliegenden chemischen Reaktionen sich pro zehn Grad Celsius Anstieg in der Wassertemperatur verdoppelt (Gaudard et al. 2017).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 26: „Freisetzung gefährlicher Stoffe“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Freisetzung gefährlicher Stoffe“

- ▶ Chemie- und Kläranlagen sind durch zunehmende Starkniederschläge und an den Küsten durch die Folgen des Meeresspiegelanstiegs und höherer Scheitelwasserstände bei Sturmfluten von erhöhten Risiken der Freisetzung gefährlicher Stoffe durch Überflutungen betroffen.
- ▶ In bebauten Gebieten kann bei durch Starkniederschlägen überlasteten Kanalisationen unbehandeltes Abwasser austreten beziehungsweise oberflächlich abfließen und in Gewässer gelangen.
- ▶ Längere Hitzeperioden können zu höherer Aufheizung von Anlagenteilen führen. Sind darin thermisch sensible Stoffe so können diese zu reagieren beginnen und Stofffreisetzungen, Brände oder Explosionen auslösen
- ▶ Durch eine zunehmende Sonneneinstrahlung, insbesondere an vermehrt auftretenden heißen Tagen, kann bodennahes Ozon größere gesundheitsschädliche Wirkungen entfalten.
- ▶ Neben den projizierten Änderungen klimatischer Einflüsse hängt das Risiko der Freisetzung gefährlicher Stoffe von Zustand und Betrieb der Anlagen mit gefährlichen Stoffen und genannten Infrastrukturen ab. Daher ergeben sich Unsicherheiten in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der klimatischen Auswirkungen.

2.2.10 Leistungseinbußen von Beschäftigten

Hintergrund und Stand der Forschung

Im Zentrum der Betrachtung dieser Klimawirkung stehen die geminderte Arbeitsproduktivität beziehungsweise die Herabsetzung der Leistungsfähigkeit von Beschäftigten infolge von klimawandelbedingten Veränderungen sowie die dadurch entstehenden wirtschaftlichen Verluste.

Zur Analyse möglicher Leistungseinbußen von Beschäftigten im Zusammenhang mit dem Klimawandel sind insbesondere der Wirtschaftssektor und die Arbeitsumgebung als strukturierende Elemente zu berücksichtigen. Bei der Arbeitsumgebung ist zunächst nach Tätigkeiten in Innenräumen und im Freien zu unterscheiden – bei Letzteren sind Beschäftigte unmittelbarer von klimatischen Einflüssen und deren Änderungen betroffen, während klimatische Einflüsse auf das Innenraumklima eine Rolle für Arbeitstätigkeiten in Innenräumen spielen. Weiterhin ergeben sich aus den Unterschieden zwischen Arbeitsgebäuden, zum Beispiel Bürogebäude und Fabriken, und zwischen Arbeitsorten außerhalb von Gebäuden, zum Beispiel Baustellen und in der Landwirtschaft, unterschiedliche Arten von Betroffenheit bei Beschäftigten infolge von klimatischen Veränderungen. Zudem sind Leistungseinbußen von der Art der körperlichen oder mentalen Beanspruchung abhängig, die die jeweilige Beschäftigung erfordert, beispielsweise wissensbasierte Dienstleistungen, Bauwirtschaft, andere körperliche Arbeitstätigkeiten im Freien.

In Innenräumen spielen die Raumtemperatur sowie die Luftfeuchte eine wesentliche Rolle. So können sich sehr hohe Raumtemperaturen beeinträchtigend auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Die Produktivität wird zwar in eher vernachlässigbarem Ausmaß beeinflusst, wenn die Hitze im Innenraum nur kurz anhält, bei einem langen Expositionszeitraum schränkt dies die Leistungsfähigkeit allerdings ein (Hellwig et al. 2012; Rupp et al. 2015). Es besteht überdies ein enger Zusammenhang der Leistungsfähigkeit zum wärmebezogenen Behaglichkeitsempfinden. Dafür wird für sitzende und leichte Tätigkeiten ein Temperaturbereich von 23 bis 26 Grad Celsius in den Sommermonaten angegeben (UBA 2019b). Laut Arbeitsstätten-Richtlinie Raumtemperaturen gilt auch in den Sommermonaten bei steigenden Temperaturen eine Temperatur von 26 Grad Celsius als erstrebenswert (ASR 6.). Da die Ansätze zur Messung und Einschätzung der Produktivität bei der Arbeitstätigkeit in wissenschaftlichen Untersuchungen variieren, lässt sich keine generelle Aussage darüber treffen, welchen Stellenwert das Behaglichkeitsempfinden für die Ausprägung der Leistungsfähigkeit hat (Rupp et al. 2015). Wenngleich Hitzebeanspruchung vom Menschen grundsätzlich so kompensiert werden kann, dass trotzdem die Fähigkeit zur mentalen Leistung fortbesteht, ist davon auszugehen, dass diese Kompensationsmöglichkeit bei länger andauernder Hitzeexposition schwindet, da diese mit psychischer und körperlicher Belastung einhergeht, und es zum Beispiel zu Müdigkeit, Konzentrationsschwäche oder Belastungen des Herz-Kreislauf-Systems kommt, oder die Arbeitsmotivation sinkt (Hellwig et al. 2012; UBA 2015).

Bei Außentätigkeiten – welche in Deutschland circa 10 bis 15 Prozent der volkswirtschaftlichen Wertschöpfung ausmachen und sowohl in Industrie- und Dienstleistungssektoren als auch in der Land- und Forstwirtschaft und im Baugewerbe angesiedelt sind (UBA 2019b) – zählen neben der Lufttemperatur und Luftfeuchte auch Klimasignale wie Wind und Niederschlag sowie extreme Witterungsbedingungen (Hagel, Sturm, Hitzewellen, Starkregen, Konvektionswetterlagen) zu den wesentlichen Faktoren, die zu Leistungseinbußen von Beschäftigten beitragen können.

Als weitere mögliche Einflussgröße kommt die Belastung durch UV-Strahlung sowie UV-Strahlungs-assoziierte Luftverunreinigungen wie bodennahes Ozon hinzu, welche die Leistungsfähigkeit von Beschäftigten herabsetzen und sogar zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen kann (Straff und Mücke 2017). Die Exposition gegenüber UV-Strahlung selbst, wie im Falle von Beschäftigten, die im Freien arbeiten, kann das Hautkrebsrisiko steigern. Neben der Art und Dauer der Strahlungsexposition ist auch der Zeitraum der Exposition für die gesundheitliche Gefährdung der im Freien Beschäftigten ausschlaggebend. So ist die UV-Strahlung während natürlicherweise auftretender Niedrigozonereignisse im Zeitraum Ende März bis Anfang April (auf der nördlichen Hemisphäre) besonders hoch. Über die letzten Jahrzehnte ließ sich eine zunehmende Häufigkeit solcher beobachten, wozu auch die globale Erwärmung beizutragen scheint (siehe 4.2.4). Zur UV-Strahlungs-bedingten Gesundheitsgefährdung von Beschäftigten im Freien trägt außerdem die Zunahme der Sonnenscheindauer pro Jahr bei.

Weiterhin können sich Aeroallergene auf die Leistungsfähigkeit von Beschäftigten im Außenbereich auswirken. Ausschlaggebend sind dabei die mit dem Klimawandel einhergehende Veränderung der Pollenlast und des Pollenspektrums sowie die Verstärkung der Symptomatik (siehe 4.2.2).

Auf die spezifischen gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch klimawandelbedingt zunehmende durchschnittliche Lufttemperaturen und häufigeres Auftreten von Hitzewellen wird im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ gesondert eingegangen (siehe 4.2.1).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Angesichts steigender durchschnittlicher Lufttemperaturen sowie häufiger auftretenden Hitzeperioden im Zuge des Klimawandels ist mit einer größeren Anzahl an Tagen zu rechnen, an denen es zu einer Minderung der geistigen und körperlichen Leistungsfähigkeit von Beschäftigten kommen kann (Zacharias und Koppe 2015). Von Einschränkungen von geistigen und körperlichen Arbeiten, die in Innenräumen verrichtet werden, ist bei mehr als 26 Grad Celsius Raumlufttemperatur auszugehen (Rupp et al. 2015; UBA 2019a). Dieser Effekt verstärkt sich bei gleichzeitig höherer relativer Luftfeuchtigkeit, welche ebenfalls die Leistungsfähigkeit mindert (siehe „Innenraumklima“ im Handlungsfeld „Bauwesen“) (Zacharias und Koppe 2015; UBA 2019a).

Bei Tätigkeiten im Freien spielt die Zunahme von Extremwetterereignissen (Hitze, hohe Windgeschwindigkeiten, Starkregen) eine entscheidende Rolle. Das Auftreten solcher Wetterlagen beziehungsweise solcher Ereignisse kann mit einer gesundheitlichen Belastung der im Freien Beschäftigten einhergehen und die Unfallgefahr bei Außentätigkeiten erhöhen, beispielsweise bei solchen, die in großer Höhe auf Baustellen stattfinden. Zu den Auswirkungen zählen unter anderem Verzögerungen oder der zusätzliche Einsatz von Technik und entsprechende finanzielle Einbußen beziehungsweise wirtschaftliche Schäden (Wienert und Walter 2011; Straff und Mücke 2017). Der Einfluss des Klimawandels auf Zeiten für Bautätigkeit wird im Handlungsfeld „Bauwesen“ genauer betrachtet.

Aussagen zur UV-Strahlungs-verknüpften Gefährdung von im Freien Beschäftigten für die Zeiträume Mitte und Ende des Jahrhunderts sind mit relativ großen Unsicherheiten verbunden. Wissenschaftliche Untersuchungen weisen zwar auf die Zunahme der schützenden Ozonschicht hin, gleichzeitig könnte die Bewölkung klimawandelbedingt abnehmen, sodass die UV-Belastung zunehmen trotzdem zunehmen könnte (siehe 4.2.4).

Außerdem können aus der Verlängerung der Pollensaison und der verstärkten Freisetzung allergener Pollen durch Pflanzen bis zur Mitte des Jahrhunderts Beeinträchtigungen für im Freien Beschäftigte entstehen (siehe 4.2.2).

Gleichzeitig weisen Klimaprojektionen für Deutschland auch auf Veränderungen hin, die entlastende Effekte für Arbeitstätigkeiten im Freien, unter anderem für den Bausektor, einschließen, wie beispielsweise das seltenere Auftreten von Frost (Wienert und Walter 2011).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 27: „Leistungseinbußen von Beschäftigten“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Leistungseinbußen von Beschäftigten“

- ▶ Infolge der steigenden durchschnittlichen Lufttemperaturen und häufiger auftretenden Hitzewellen, die sich auch auf das Innenraumklima von Gebäuden auswirken können, ist mit einer höheren Anzahl an Tagen pro Jahr zu rechnen, an denen die geistige und körperliche Leistungsfähigkeit von Beschäftigten, die in Innenräumen arbeiten, gemindert sein kann.
- ▶ Durch die Zunahme von Extremereignissen, wie unter anderem Hitzewellen, hohen Windschwindigkeiten, Starkregen und Hagel, können Leistungseinbußen durch Unfälle oder gesundheitliche Belastungen von im Freien Beschäftigten zunehmen.
- ▶ Im Freien Beschäftigte sind zudem potenziell steigenden UV-Belastungen und Pollenlasten ausgesetzt.
- ▶ Auch Luftverunreinigungen, die UV-Strahlungsbedingt auftreten, wie bodennahes Ozon, können zur Zunahme von Leistungseinbußen bei Arbeitstätigkeiten im Freien beitragen.

2.2.11 Beeinträchtigung von Produktionsprozessen

Hintergrund und Stand der Forschung

Unter einem Produktionsprozess wird in der Industriebetriebslehre ein „[t]echnologisch, zeitlich und örtlich bestimmtes effizientes Zusammenwirken von Produktionsfaktoren zur Herstellung einer bestimmten Gütermenge in bestimmter Qualität“ verstanden (Voigt et al. 2018). Klimawandelbedingte Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen können sowohl durch direkte Einwirkungen an der Produktionsstätte als auch durch Einschränkungen des Warentransports hervorgerufen werden.

Durch Extremwetterereignisse können Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur entstehen. Dabei können die damit verbundenen Langzeitfolgen von Betriebsausfällen höhere Kosten verursachen als die physischen Zerstörungen (Lühr et al. 2014).

An der Produktionsstätte können zudem Einschränkungen der Energie- und Wasserversorgung auftreten. Für den reibungslosen Ablauf von Produktionsprozessen ist die Verfügbarkeit von Energie und Wasser essenziell (Auerswald und Vogt 2010; Lühr et al. 2011a; Nies und Apfel 2011). Vor allem Stürme, Unwetter oder Hitze können die Energieversorgung beeinträchtigen (siehe Handlungsfeld „Energiewirtschaft“), während die Versorgung mit Produktionswasser besonders durch Trockenheit und Niedrigwasser eingeschränkt werden kann (siehe Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“).

Leistungseinbußen von Maschinen und Arbeitskräften können sich ebenfalls negativ auf Produktionsprozesse auswirken (Günther et al. 2013a). Hochtechnologieprozesse sind zudem oft von stabilen Witterungsbedingungen abhängig (Günther et al. 2013b). Veränderungen von Temperatur oder Luftfeuchtigkeit können hier bei unzureichender Klimatisierung zu Problemen führen.

Klimabedingte Leistungseinbußen von Beschäftigten entstehen insbesondere durch Hitzebelastung, bei Beschäftigten im Freien auch durch Extremwetterereignisse und eine damit verbundene Unfallgefahr (siehe 2.2.10).

Eine effiziente und störungsfreie Produktion kann nur durch ein widerstandsfähiges Liefernetzwerk sichergestellt werden (Groth et al. 2014). Unternehmen mit „just-in-time“-Produktion sind dabei besonders auf eine reibungslose Logistik angewiesen (Nies und Apfel 2011). Durch Extremwetterereignisse wie Starkniederschläge, Stürme und Hitzeperioden kann der landgestützte Warenverkehr und der Flugverkehr beeinflusst werden, während insbesondere Niedrigwasserereignisse eine Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Bundeswasserstraßen verursachen können. Ob Produktionsprozesse durch Beeinträchtigungen des Warenverkehrs eingeschränkt werden hängt auch davon ab, inwieweit alternative Transportwege genutzt werden können, also ob beispielsweise von landgestütztem Verkehr auf Schiffstransporte ausgewichen werden kann.

Des Weiteren werden hiesige Produktionsprozesse nicht nur von inländischen Faktoren beeinflusst, sondern sind oft auf von Leistungen aus dem Ausland abhängig (Grömling 2017). Insbesondere Störungen des internationalen Lieferverkehrs können die Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten beeinträchtigen. Beispielsweise können durch tropische Stürme und die damit verbundene Beschädigung von Hafenanlagen und Containerterminals in Rohstoffexportländern Lieferengpässe entstehen (siehe 2.2.4).

Neben Versorgungsengpässen können auch Auslieferungsgpässe bereits hergestellter Produkte zukünftige Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen nach sich ziehen, da in der Folge der Absatz der hergestellten Produkte gefährdet ist. Rückkopplungseffekte auf Produktionsprozesse können die Folge sein (Lühr et al. 2014). Produkte, bei welchen schon geringfügig Preissteigerungen dazu führen, dass Kunden und Kundinnen zu anderen Marken wechseln, können Unternehmen Marktanteile verlieren und gegebenenfalls Jahre benötigen, um sich davon zu erholen (Lühr et al. 2014).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Es ist zu erwarten, dass durch den Klimawandel Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser und Starkregenereignissen zunehmen könnten (siehe „Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen und Flusshochwasser“ im Handlungsfeld „Bauwesen“).

Inwieweit die Verfügbarkeit von geeignetem Produktionswasser zukünftig beeinträchtigt sein wird, lässt sich schwer abschätzen (siehe Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“). Klimawandelbedingte Zunahmen von Wassertemperaturen und Niedrigwasserereignissen könnten die Nutzbarkeit von Kühlwasser aus Flüssen reduzieren. Zugleich könnte sich durch bereits angestrebte Verbesserungen im Abwasserrecycling und durch effiziente Kühlsysteme der Wasserbedarf und die Wärmelast in Gewässern reduzieren. Die Energieversorgung von Unternehmen kann bis zur Mitte des Jahrhunderts durch die Zunahme von Starkniederschlägen und erhöhten Temperaturen sowie dem andauernden Netzausbau im Rahmen der Energiewende kurzfristige Beeinträchtigungen erfahren (siehe „Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“).

Aufgrund steigender durchschnittlicher Lufttemperaturen sowie einer Zunahme von Extremwetterereignissen und Gesundheitsbelastungen bei Außenarbeiten (unter anderem UV-Belastungen) ist damit zu rechnen, dass Leistungseinbußen von Beschäftigten klimawandelbedingt zunehmen werden. Erhöhte Temperaturen und eine veränderte Luftfeuchtigkeit könnten sich zudem auf die Leistungsfähigkeit von Maschinen auswirken (Günther et al. 2013b).

Zunehmende Starkniederschläge und die steigende Anzahl an heißen Tagen können in Zukunft zu steigenden Beeinträchtigungen bei Lieferprozessen auf Straßen und Schienen führen (siehe

2.2.6). Da hierbei voraussichtlich eher kurze Unterbrechungen der Transportinfrastruktur entstehen, ist lediglich von geringen Auswirkungen auf Produktionsprozesse auszugehen. Des Weiteren kann eine Zunahme von Niedrigwasserständen verstärkt den Warenverkehr über Bundeswasserstraßen beeinträchtigen, wodurch auch hier vermehrt Lieferverzögerungen auftreten können.

Im internationalen Warentransport ist mit starken klimawandelbedingten Auswirkungen zu rechnen, insbesondere im Schiffsverkehr (siehe 2.2.4). Inwieweit dadurch Produktionsprozesse beeinträchtigt werden ist abhängig von den Branchen und den verwendeten Handelsrouten deutscher Unternehmen. Die Zunahme extremer Wetterereignisse in klimavulnerablen Zuliefererländern kann zu Lieferengpässen führen (siehe 2.2.1). Von beeinträchtigten Rohstofflieferketten könnten insbesondere Produktionsprozesse in der Fahrzeug- und Maschinenindustrie betroffen sein.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich das Grundverständnis von Produktionsprozessen durch die erwartete digitale Transformation der Industrie und die zunehmende Automatisierung weiter verändert (Kempermann und Millack 2018). Bisherige Aktivitäten im Bereich der „Industrie 4.0“ haben bereits vor allem durch die Digitalisierung von Wertschöpfungsketten und integrierte Datennutzung zu signifikanten Steigerungen der Produktionseffizienz geführt (Koch et al. 2014b). Eine tiefgreifende und intelligente Vernetzung könnte neue Möglichkeiten schaffen, in Produktionsprozessen schnell auf sich verändernde Bedingungen wie Material-, Energie- oder Wassermangel zu reagieren (Erol et al. 2016). Allerdings könnte mit zunehmender Digitalisierung auch die Abhängigkeit von einer leistungsfähigen digitalen Infrastruktur und einer zuverlässigen Energieversorgung steigen (BMU 2018). Zudem bleibt fraglich, inwieweit sich lokal begrenzte Risiken auf unternehmensübergreifende und immer stärker vernetzte Produktionsprozesse auswirken werden (Hertel 2015).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 28: „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	gering	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen“

- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen, Beeinträchtigungen der Energie- und Wasserversorgung, Leistungseinbußen von Beschäftigten und Maschinen sowie Einschränkungen nationaler und internationaler Lieferketten können zukünftig durch den Klimawandel zunehmen und so Produktionsprozesse beeinträchtigen.
- ▶ Die erwartete digitale Transformation der Industrie und die zunehmende Automatisierung werden voraussichtlich zu weiteren grundlegenden Veränderungen von Produktionsprozessen führen, deren Klimavulnerabilität derzeit nicht eingeschätzt werden kann.

2.2.12 Aufwand für die betriebliche Planung

Hintergrund und Stand der Forschung

Die betriebliche Planung dient der Steuerung und Kontrolle von Unternehmen und basiert auf strategischen, taktischen und operativen Entscheidungen (Schön 2016). Sie ist somit ein unerlässliches Instrument um erfolgreich zu wirtschaften. Der Klimawandel kann sowohl durch Extremwetterlagen wie Starkregen, Überschwemmungen und Hitzewellen, als auch durch langfristige klimatische Veränderungen die betrieblichen Rahmenbedingungen für Unternehmen beeinflussen und zu einem erhöhten Aufwand für die betriebliche Planung führen (BMU 2009; Mahammadzadeh et al. 2013).

Besonders das produzierende Gewerbe ist von einem steigenden Aufwand für betriebliche Planungen betroffen, da Extremwetterereignisse zu Produktionsengpässen oder Einschränkungen ganzer Versorgungsketten führen können (siehe 2.2.1 und 2.2.2) (Lühr et al. 2014; Dombrowski et al. 2016). Neben der Gefahr durch physische Schäden an gewerblicher Infrastruktur beeinträchtigen auch potenzielle klimawandelbedingte Einschränkungen der Energie- und Wasserversorgung und Qualitätsschwankungen die Planungssicherheit von Unternehmen (siehe 2.2.11) (Peter et al. 2019a). Des Weiteren können Hitzewellen zu Produktivitätseinschränkungen führen und Planungsprozesse beeinflussen (siehe 2.2.10) (Zacharias und Koppe 2015; Klepper et al. 2017).

Aufgrund der zunehmenden Internationalisierung der Wertschöpfungsketten und durch den hohen Anteil an Importen und Exporten sind negative Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Wirtschaft vor allem durch internationale Rückkopplungseffekte zu erwarten (Benzie et al. 2016). Dabei werden die Planungsaktivitäten neben den direkten Auswirkungen für das eigene Unternehmen auch durch mögliche Klimawirkungen auf zuliefernde und abnehmende Firmen beeinflusst (Lühr et al. 2014). Dies gilt insbesondere für die zwischengeschalteten Transportwege und die betriebliche Logistik, welche von Unternehmen als besonders wettersensibel eingeschätzt wird (Dombrowski et al. 2016; Klepper et al. 2017). Besonders international oder „just-in-time“ arbeitende Unternehmen könnten überdurchschnittlich von unerwarteten Ausfällen getroffen werden (Gebauer et al. 2011; Lühr et al. 2011b).

Auch für die Personalplanung ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, insbesondere durch die potenziellen klimawandelbedingten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (Klepper et al. 2017).

Schließlich führen Unsicherheiten in anderen Planungsbereichen auch zu einem Mehraufwand in der Finanz- und Investitionsplanung (Klepper et al. 2017). Ansätze zur Quantifizierung von klimawandelbedingten Schäden beziehen sich bisher jeweils auf einzelne klimatische Einflüsse (zum Beispiel Hitzewellen) oder Sektoren (zum Beispiel Landwirtschaft) (siehe Handlungsfeld „Landwirtschaft“). Dabei müssen sowohl die Kosten für die Vorsorge gegenüber Extremwetterereignissen, als auch die Kosten, welche durch das Eintreten solcher Ereignisse entstehen, berücksichtigt werden. Da die direkten Effekte oder Rückkopplungseffekte eines klimatischen Einflusses je nach Sektor unterschiedliche, gegebenenfalls sogar positive Auswirkungen haben können, ist keine Addierung der Kosten möglich (Klepper et al. 2017).

Neben den beschriebenen klimawandelbedingten Einflussfaktoren können Planungsprozesse auch durch die Themen Digitalisierung und Industrie 4.0 sowie durch neue Organisationskonzepte Veränderungen erfahren (Koch et al. 2014b; Henzelmann et al. 2018). Dies könnte eine erhöhte Flexibilität im Umgang mit Klimafolgen und eine allgemeine Effizienzsteigerung mit sich bringen (Koch et al. 2014b; Schmidt 2015; Jacob 2019).

Klimafolgen und Klimaanpassungsmaßnahmen finden zunehmende Berücksichtigung in unternehmerischen Planungen. So werden beispielsweise Versicherungen gegenüber Klimaschäden und Lieferausfällen getroffen (Fichter und Stecher 2011; Klepper et al. 2017). Des Weiteren steigt die Nachfrage nach Klimaschutz- und Klimaanpassungstechnologien (DIHK Service GmbH und BMU 2019). Einzelne operative Maßnahmen und kurzfristige Kosteneinsparungen, beispielsweise zur Energieeinsparung, werden bisher allerdings langfristigen Anpassungsmaßnahmen vorgezogen (Mahammadzadeh et al. 2013; Klepper et al. 2017).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die zukünftige Entwicklung des Planungsaufwands für Unternehmen hängt maßgeblich von der Entwicklung der im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ beschriebenen Klimawirkungen ab und ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Auf lange Sicht sind Veränderungen im Aufwand für die betriebliche Planung für ganz Deutschland zu erwarten (Mahammadzadeh et al. 2013; Klepper et al. 2017). Diese können neben Anpassungen in der operativen und taktischen Planung auch grundlegende Änderungen in der strategischen Ausrichtung oder gar Änderungen des Geschäftsmodells beinhalten.

Als wesentlich für die zukünftige Gewährleistung von Planungssicherheit schätzen deutsche Unternehmen vor allem die Anpassung betrieblicher Infrastruktur und die Versicherung gegen die Folgen von Extremwetterereignissen ein (Klepper et al. 2017). Gleichzeitig gehen Unternehmen in den Bereichen Logistik, Maschinenbau und Dienstleistungen davon aus, dass sich durch den Klimawandel durchschnittlich mehr Chancen als Risiken für ihre Branche ergeben (Klepper et al. 2017).

Die Abschätzung der Kosten des Klimawandels gestaltet sich aufgrund zahlreicher und komplexer Rückkopplungseffekte auf unterschiedlichen Zeitskalen sowie Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung von extremen Wetterereignissen und von Anpassungsmaßnahmen äußerst schwierig (Mahammadzadeh et al. 2013; Klepper et al. 2017). Die finanzielle Betroffenheit von kleinen und mittleren Unternehmen wird voraussichtlich besonders stark ausfallen.

Zu den Unsicherheiten aufgrund der komplexen Wirkungsmechanismen einzelner Klimaparameter und deren Auswirkungen für die Wirtschaft kommen große Unsicherheiten hinsichtlich der wirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland und weltweit hinzu, welche besonders für die zweite Hälfte des Jahrhunderts bestehen (Mahammadzadeh et al. 2013; Klepper et al. 2017).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 29: „Aufwand für die betriebliche Planung“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	gering	gering	gering
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Aufwand für die betriebliche Planung“

- ▶ Der Aufwand für die betriebliche Planung wird infolge des Klimawandels, insbesondere durch schwer abzuschätzende Extremwetterereignisse, zunehmen.
- ▶ Aufgrund der komplexen Wirkungsmechanismen und Rückkopplungseffekte sind Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Aufwands für die betriebliche Planung mit großen Unsicherheiten verbunden.

2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Die Betroffenheit deutscher Unternehmen von den Folgen des Klimawandels ist abhängig von verschiedenen Faktoren. So tragen beispielsweise der Wirtschaftszweig, die Unternehmensgröße, die internationale Ausrichtung des Unternehmens oder die Innovationsfähigkeit zur Betroffenheit bei und sind gleichzeitig auch wichtige Ansatzpunkte für Anpassung und für die Stärkung der Anpassungskapazität (Apfel et al. 2012).

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ sind laut APA III vergleichsweise viele Anpassungsmaßnahmen beschlossen. Diese stehen in engem Zusammenhang mit dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. So werden diverse Maßnahmen zur Anpassung des Warentransportes und der Transportinfrastruktur aufgeführt. Weitere beschlossene Maßnahmen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ befinden sich im Bereich der Erfassung von und Anpassung an wetterbedingte Extremereignisse und deren Auswirkungen auf Industriestandorte und -gebäude. Weiterhin werden Instrumente zum Arbeitsschutz und zur Anlagensicherheit und zur Sicherung von gefährlichen Stoffen genannt.

Aufgrund der hohen Heterogenität der deutschen Industrie und des Gewerbes und damit einhergehend der im Handlungsfeld untersuchten Klimawirkungen, ergibt sich auch ein breites Feld möglicher weiterreichender Anpassungsmöglichkeiten. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere Anpassung durch den Bund im Rahmen staatlichen Handels betrachtet wird. Autonome Anpassung der Unternehmen selbst kann durch diese Maßnahmen angestoßen und die Rahmenbedingungen zur Anpassung können verbessert werden. Daher können weiterreichende Maßnahmen besonders in den Dimensionen „Wissen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ und „Finanzielle Ressourcen“ ansetzen. Beispiele hierfür sind Informationskampagnen, Beratungsangebote, Anpassungsprämien oder gezielte Fördermittel (Hoffmann et al. 2019). Auch regulatorische Marktveränderungen, wie beispielsweise Sicherheitsstandards im Rahmen von Bauvorschriften, schaffen einen Handlungsrahmen für Anpassung (Nies und Apfel 2011; Gawel und Heuson 2012; Hoffmann et al. 2019). Um eine große Anzahl an Unternehmen in verschiedenen betroffenen Sektoren zu adressieren, kann sich eine verstärkte Zusammenarbeit mit Wirtschaftsverbänden als hilfreich erweisen (Apfel et al. 2012). Zusätzlich zu den genannten Maßnahmen können Anpassungsleitfäden für Industrie und Gewerbe als Richtschnur für Anpassung dienen und die erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen beeinflussen (co2ncept plus und BMU 2019; Hoffmann et al. 2019).

Betrachtet man die Relevanz der einzelnen Anpassungsdimensionen für das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“, so spielen von den oben genannten Dimensionen, in denen weiterreichende Maßnahmen ansetzen können, insbesondere „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ und „Finanzielle Ressourcen“ eine wichtige Rolle zur Stärkung der Anpassungskapazität. Bereits stark ausgeprägt ist die Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ (Ott und Richter 2008). Neben den genannten Aspekten ist die Dimension „Motivation und Akzeptanz“ von großer Bedeutung für die Anpassungskapazität im Handlungsfeld. Ist die Betroffenheit seitens der Unternehmen klar ersichtlich, obliegt die Anpassung oft auch einem wirtschaftlichen Interesse. Sind die Auswirkungen des Klimawandels auf das Unternehmen oder den Wirtschaftszweig jedoch nicht bekannt, so können Anreize zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen fehlen (Apfel et al. 2012). Die eigene Betroffenheit wird dabei oft erst durch das konkrete Erfahren der Folgen des Klimawandels, wie zum Beispiel Schäden an Betriebsgebäuden durch Flusshochwasser, ersichtlich (Apfel et al. 2012). Risikoanalysen für spezifische Wirtschaftszweige oder Lieferketten können zu einer Steigerung der Risikowahrnehmung beitragen (Freimann et al. 2011).

Obleich kleinere Unternehmen oft flexibler auf Änderungen reagieren können als Großunternehmen mit komplexen Organisationsstrukturen, können kleine und mittlere Unternehmen verstärkt finanziellen Hindernissen der Umsetzung ausgesetzt sein (Freimann et al. 2011; Mahammadzadeh et al. 2013). Ein weiteres Hindernis der Anpassung im Handlungsfeld können die verschiedenen zeitlichen Planungshorizonte im Bereich der Unternehmen und im Bereich des staatlichen Handelns darstellen, da Maßnahmen gegebenenfalls nicht zum benötigten Zeitpunkt abgerufen werden können (Apfel et al. 2012; Mahammadzadeh et al. 2013). Anpassung im Handlungsfeld kann an seine Grenzen stoßen, sofern staatliche Maßnahmen zur Schaffung von Marktungleichgewichten führen oder sich Anpassung für Unternehmen als nicht mehr rentabel erweist.

Systemübergreifende Maßnahmen der transformativen Anpassung könnten speziell im Bereich der Handelsbeziehungen (für Klimawirkungen mit Schnittstellen im Bereich Transport/Logistik), der Einführung innovativer Organisationsstrukturen oder selbstgesteuerter Beschaffungsprozesse ansetzen. Die Vereinbarung spezifischer Handelsverträge und Anpassungsabkommen kann die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Erhöhung der Anpassungskapazität betroffener Unternehmen stärken (Gawel und Heuson 2012). Innovative Organisationsstrukturen in Unternehmen können kreative Lösungsprozesse fördern, die die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen und flexible Prozessänderungen begünstigen können (Apfel et al. 2012). Beschaffungsprozesse könnten durch die Entwicklungen der Industrie 4.0 zukünftig durch selbstgesteuerte Systeme ausgeführt werden, welche auch die Auswirkungen des Klimawandels in der Lieferkette berücksichtigen (PwC 2020).

Insgesamt ergibt sich ein heterogenes Bild der Anpassung im Handlungsfeld. Dies ist auch mit der Diversität der deutschen Unternehmenslandschaft zu begründen. Die beschlossenen Maßnahmen, um sich an die verschiedenen Auswirkungen des Klimawandels auf die Klimawirkungen im Handlungsfeld anzupassen, sind vielfältig. Weiterreichende Anpassungsmaßnahmen, um auf die Exposition und Sensitivität einzuwirken, decken ein breites Spektrum ab.

2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

In der gemeinsamen Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Klimawirkungen können keine direkten Zusammenhänge aufgeführt werden. Jedoch lässt sich eine indirekte Wirkbeziehung zwischen der Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Bundeswasserstraßen und der Beeinträchtigung der internationalen Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten feststellen. So können Einschränkungen der Schiffbarkeit zu Lieferverzögerungen führen, die sich auch auf die Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten auswirken können, sofern diese über deutsche Wasserstraßen transportiert werden.

Im Handlungsfeld wurden verschiedene Klimawirkungen betrachtet, die in engem Zusammenhang mit Klimawirkungen aus dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ stehen. So wirken auch die beschlossenen Maßnahmen/Instrumente aus diesem Bereich, wie beispielsweise der Aktionsplan Niedrigwasser, auf mehrere Klimawirkungen aus beiden Handlungsfeldern ein. Andere beschlossene Maßnahmen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ weisen zudem Wirkbeziehungen mit den Handlungsfeldern „Bauwesen“ und „Menschliche Gesundheit“ aus.

Bei Betrachtung der weiterreichenden Anpassungsmaßnahmen wird deutlich, dass diese aufgrund der hohen Heterogenität der Klimawirkungen im Handlungsfeld eine hohe Diversität aufweisen. Je nach betrachteter Klimawirkung können so auch weitere Wirkbeziehungen zu anderen Handlungsfeldern und Klimawirkungen hergestellt werden.

2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Unter Betrachtung der drei Querschnittsfelder trägt insbesondere die Finanzwirtschaft zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ bei. Versicherungen für physische Klimarisiken können die Auswirkungen potenzieller Schäden abmildern (Mahammadzadeh et al. 2013). Vorgaben bei der Vergabe von Krediten oder Investitionen, zum Beispiel in klimaangepasste Neubauten, können weiterhin Anreize zur Anpassung schaffen (Hoffmann et al. 2019). Das Querschnittsfeld Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung kann die Anpassungskapazität des Handlungsfeldes speziell bei räumlichen Anpassungsprozessen, welche eine Flächenänderung erfordern, unterstützen. Der Bevölkerungs- und Katastrophenschutz setzt bei den Wirtschaftszweigen an, die für die Versorgungssicherheit eine hohe Relevanz aufweisen oder kritische Infrastrukturen involvieren. So unterstützt er beispielsweise bei der Bereitstellung von Leitfäden zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen wie der Erarbeitung von Notfall- und Evakuierungsplänen (APA III: 5.5).

2.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 30: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		mittel	gering	mittel	gering	mittel	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Bedingungen auf Absatzmärkten (international)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Wasserbedarf	Klimarisiko	mittel	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Freisetzung gefährlicher Stoffe	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		hoch		
Leistungseinbußen von Beschäftigten	Klimarisiko	mittel	gering	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Beeinträchtigung von Produktionsprozessen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Aufwand für die betriebliche Planung	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien							
			chancenreich	chancenarm	chancenreich	chancenarm	
Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien	Potenzial	mittel	mittel	gering	mittel	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Tabelle 31: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering-mittel	gering-mittel	gering	mittel	gering	ja
		mittel	mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	gering	gering	gering	hoch	mittel	ja
		mittel	gering-mittel			
Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	mittel	mittel	gering-mittel	hoch	mittel	ja
		mittel	mittel			

Tabelle 32: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung	
		optimistisch	pessimistisch		2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	gering	mittel	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	mittel-hoch
Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	mittel	mittel	hoch	gering	gering	mittel-hoch	gering	mittel

2.5 Quellenverzeichnis

- Albrecht, J.; Gronwald, M.; Karl, H.-D.; Pfeiffer, J.; Röpke, L.; Zimmer, M.; Lippelt, J. (2011): Bedeutung der Energiewirtschaft für die Volkswirtschaft. Studie im Auftrag der RWE AG. ifo Forschungsberichte 50. RWE AG, München.
- Andruleit, H.; Elsner, H.; Graupner, T.; Homberg-Heumann, D.; Huy, D.; Pein, M.; Schauer, M.; Schmidt, S.; Schmitz, M.; Sievers, H.; Szurlies, M.; Wehenpohl, B. (2017): Deutschland - Rohstoffsituation 2017. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Ante, A.; Behrendt, J.; Bennemann, H.; Blöcher, C.; Bolduan, P.; Geißen, S.-U.; Horn, H.; Krull, R.; Kunz, P. M.; Marzinkowski, J. M.; Neumann, S.; Oles, V.; Rösler, H.-W.; Rother, E.; Schramm, K.-W.; Sievers, M.; Szewzyk, U.; Track, T.; Voigt, I.; Wienands, H. (2014): Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik. Rohrwasser, Prozess, Abwasser. Positionspapier der ProcessNet-Fachgruppe Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik. ProcessNet-Fachgruppe, Frankfurt am Main.
- Apfel, D.; Nies, M.; Lühr, O. (2012): Anpassungskapazität der dynaklim-Wirtschaft: Vulnerability-Assessment der dynaklim-Wirtschaft Teil 3.
- ASR 6: Arbeitsstätten-Richtlinie Raumtemperaturen (ASR 6). Ursprünglich gefasst 2019.
- Auerbach, M.; Hermann, C. (Hrsg.) (2014): Adaptation of the road infrastructure to climate change. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Transport Research Arena (TRA) (in Paris. 2014.
- Auerbach, M.; Herrmann, C.; Krieger, B.; Mayer, S. (2014): Klimawandel und Straßenverkehrsinfrastruktur. Straße und Autobahn 7, S. 531–539.
- Auerswald, H.; Lehmann, R. (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Verarbeitende Gewerbe. Ergebnisse einer Unternehmensbefragung. ifo Dresden berichtet 18 (02/2011), S. 16–22.
- Auerswald, H.; Vogt, G. (2010): Zur Klimasensibilität der Wirtschaft in der Region Dresden. ifo Dresden berichtet 17 (03/2010), S. 15–23.
- Bardt, H.; Chrischilles, E.; Mohammadzadeh, M. (2012): Klimawandel und Unternehmen. Wirtschaftsdienst 92 (13/2012), S. 29–36. doi:10.1007/s10273-012-1347-6.
- Bastian, D.; Brandenburg, T.; Buchholz, P.; Huy, D.; Liedtke, M.; Schmidt, M.; Sievers, H. (2019): DERA-Rohstoffliste 2019. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten - potenzielle Preis- und Lieferrisiken. Deutsche Rohstoffagentur (BGR), Berlin.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hrsg.) (2017): Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen, Augsburg.
- Becker, A.; Ng, A. K.; McEvoy, D.; Mullett, J. (2018): Implications of climate change for shipping: Ports and supply chains. WIREs Clim Change 9, e508. doi:10.1002/wcc.508.
- Bender, S.; Butts, M.; Hagemann, S.; Smith, M.; Vereecken, H.; Wendland, F. (2017): Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland. Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013. Climate Service Center Germany (GERICS), Hamburg.
- Benzie, M.; Adams, K. M.; Roberts, E.; Magnan, A. K.; Persson, Å.; Nadin, R.; Klein, R. J.; Harris, K.; Treyer, S.; Kirbyshire, A. (2018): Meeting the global challenge of adaptation by addressing transboundary climate risk. A joint collaboration between SEI, IDDRI, and ODI. Stockholm Environment Institute (SEI).
- Benzie, M.; Carter, T.; Groundstroem, F.; Carlsen, H.; Savvidou, G.; Pirttioja, N.; Taylor, R.; Dzebo, A. (2017a): Implications for the EU of cross-border climate change impacts. EU FP7 IMPRESSIONS Deliverable D3A.2. European Commission (EC).
- Benzie, M.; Hedlund, J.; Carlsen, H. (2016): Introducing the Transnational Climate Impacts Index: Indicators of country-level exposure: methodology report. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

- Benzie, M.; Hedlund, J.; Carlsen, H. (2017b): Transnational climate change impacts. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Benzie, M.; Persson, Å. (2019): Governing borderless climate risks: moving beyond the territorial framing of adaptation. *Int Environ Agreements* 19 (4-5), S. 369–393. doi:10.1007/s10784-019-09441-y.
- Berger, N.; Lindemann, A.-K.; Böhl, G.-F. (2019): Wahrnehmung des Klimawandels durch die Bevölkerung und Konsequenzen für die Risikokommunikation 5, Berlin. doi:10.1007/s00103-019-02930-0.
- Beucker, S.; Clausen, J.; Fichter, K.; Jacob, K.; Bär, H. (2014): Technologien und Dienstleistungen für Klimaschutz und Klimaanpassung aus Deutschland. Unterstützung des UNFCCC-Technologiemechanismus durch die National Designated Entity of Germany. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), München.
- Bieritz, L. (2015): Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft. Welche Folgen hat die Erwärmung auf die Energieerzeugung und -verteilung? GWS, Osnabrück.
- BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) vom 17. Mai 2013. Ursprünglich gefasst 1974.
- Blazejczak, J.; Edler, D.; Kahlenborn, W.; Linsenmeier, M.; Oehlmann, M.; Bacher, K.; Lehr, U.; Lutz, C.; Nieters, A.; Flaute, M.; Büchele, R.; Wolgam, G. (2019a): Wirtschaftliche Chancen durch Klimaschutz: Der Status Quo. *Climate Change* 17/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Blazejczak, J.; Edler, D.; Kahlenborn, W.; Linsenmeier, M.; Oehlmann, M.; Bacher, K.; Töpfer, K.; Lehr, U.; Lutz, C.; Nieters, A.; Flaute, M.; Büchele, R.; Wolgam, G. (2019b): Wirtschaftliche Chancen durch Klimaschutz (II): Die wachsenden Weltmärkte für Klimaschutzgüter und -dienstleistungen. *Climate Change* 18/2019, Dessau-Roßlau.
- Bölscher, J.; Dumm, M.; Suthfeldt, R.; Vogt, B.; Bölscher, J.; Terytze, K.; Schulte, A. (2017): Dynamik, Schadstoffbelastung und Ökotoxizität der Sedimente in der Rummelsburger Bucht – Berliner Spree. Endbericht des Forschungsprojektes RuBuS, Berlin.
- Bott, F.; Lohrengel, A.-F.; Forbriger, M.; Haller, M.; Jensen, C.; Löwe, P.; Ganske, A.; Herrmann, C. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext von Stürmen. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. doi:10.5675/EXPBNBF2020.2020.05.
- Bräuer, I.; Umpfenbach, K.; Blobel, D.; Grünig, M.; Best, A. (2009): Klimawandel: Welche Belastungen entstehen für die Tragfähigkeit der Öffentlichen Finanzen? Ecologic Institut.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder. LAWA-Experten-Gruppe "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft", Berlin.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.) (2017): Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese, Bern.
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hrsg.) (2019): Hintergrundinformationen zur Besonderen Ausgleichregelung. Antragsverfahren 2018 für Begrenzung der EEG-Umlage 2019, Eschborn.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hrsg.) (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen. Ausgewählte vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11. 2013. KLIWAS-22/2013, Koblenz.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG); Deutscher Wetterdienst (DWD); Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH); Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.) (2015): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen. Synthesebericht für Entscheidungsträger. KLIWAS-57/2015. doi:10.5675/Kliwas57/2015Synthese.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2016): Zukunft der Arbeit - Innovationen für die Arbeit von morgen. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2009): Dem Klimawandel begegnen: Die Deutsche Anpassungsstrategie, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2017): Bekanntmachung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) über die Förderung des Exports grüner und nachhaltiger (Umwelt-) Infrastruktur vom 5. April 2017, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III 2020-2030. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2014): Sicherheitsstrategie für die Güterverkehrs- und Logistikwirtschaft. Schutz kritischer Infrastrukturen und verkehrsträgerübergreifende Gefahrenabwehr, Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2016a): Bundesverkehrswegeplan 2030, Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2016b): Das BMVI-Expertennetzwerk Wissen - Können - Handeln, Berlin.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.) (2013): Die Zukunft von Wasserstraßen und Schifffahrt gestalten in Zeiten des Klimawandels. Wie passen wir uns an? Fachliche Schlussfolgerungen des BMVBS aus den vorläufigen Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS für die 3. KLIWAS-Statuskonferenz 12./13. November 2013 im BMVBS, Berlin, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2018a): Anteil des Verarbeitenden Gewerbes an der Bruttowertschöpfung in den jeweiligen EU-Mitgliedstaaten, 2007 und 2017. Download unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/anteil-verarbeitendes-gewerbe-an-bruttowertschoepfung-in-eu-mitgliedstaaten.html>. Stand: 27.04.2020.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2018b): Fakten zum deutschen Außenhandel, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019a): Digitale Transformation in der Industrie. Download unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>. Stand: 12.09.2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019b): Energiedaten: Gesamtausgabe. Stand: Oktober 2019, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019c): Jahreswirtschaftsbericht 2019. Soziale Marktwirtschaft stärken - Wachstumspotentiale haben, Wettbewerbsfähigkeit erhöhen, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019d): Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“. Abschlussbericht, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019e): Nationale Industriestrategie 2030. Strategische Leitlinien für eine deutsche und europäische Industriepolitik, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019f): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019g): Wirtschaftsmotor Mittelstand – Zahlen und Fakten zu den deutschen KMU.

Bundesregierung (Hrsg.) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.

- Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt (BDB); Bundesverband öffentlicher Binnenhäfen (BÖB); Bundesverband Spedition und Logistik (DSLVL); Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV); Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) (Hrsg.) (2020): Kombinierten Verkehr erfolgreich gestalten. Voraussetzungen für eine nachhaltige Verkehrswende aus der unternehmerischen Praxis, Duisburg, Berlin, Köln.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (Hrsg.) (2019): Energy market Germany, Berlin.
- Camarinha-Matos, L. M. (2007): Collaborative Networks In Industry Trends and Foundations. Digital Enterprise Technology, S. 45–56. doi:10.1007/978-0-387-49864-5_5.
- Chen, C.; Noble, I.; Hellmann, J.; Coffee, J.; Murillo, M.; Chawla, N. (2015): University of Notre Dame Global Adaptation Index. Country Index Technical Report. University of Notre Dame.
- Chrischilles, E.; Mahammadzadeh, M. (2014): Wahrnehmung des Klimawandels in deutschen Großunternehmen. Erkenntnisse aus dem Carbon Disclosure Project. IW-Trends (1).
- Dellink, R.; Hwang, H.; Lanzi, E.; Chateau, J. (2017): International trade consequences of climate change. OECD Trade and Environment Working Papers 2017/01. doi:10.1787/9f446180-en.
- Deutscher Bundestag (2016): Bundestagdrucksache 18/9282: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Bärbel Höhn, Annalena Baerbock, Sylvia Kotting-Uhl, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Verletzbarkeit der deutschen Wirtschaft und ihrer Lieferketten gegenüber dem Klimawandel, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2018): Antwort der Bundesregierung: Wassernutzung und Wasserrisiko in Deutschland. Kleine Anfrage der Abgeordneten Peter Meiwald, Friedrich Ostendorff, Annalena Baerbock, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Berlin.
- DIHK Service GmbH; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2019): Exportinitiative Umwelttechnologien. Umweltschutz "Made in Germany", Berlin.
- Dombrowski, U.; Ernst, S.; Reimer, A. (2016): A New Training for Factory Planning Engineers to Create Awareness of Climate Change. Procedia CIRP 48, S. 443–448. doi:10.1016/j.procir.2016.04.083.
- Dunkelberg, E.; Hirschl, B.; Hoffmann, E. (2009): Ergebnis des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Energiewirtschaft. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Düring, R.-A. (2012): Verhalten von prioritären gefährlichen Stoffen im Dreiphasensystem Wasser-Sediment-Organik. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hrsg.) Partikuläre Stoffströme in Flusseinzugsgebieten. Kolloquium am 20./21. September 2011 in Koblenz - Veranstaltungen 1/2012. Koblenz. S. 22–31.
- Eckstein, D.; Hutfils, M.-L.; Wings, M. (2018): Global Climate Risk Index 2019. Who suffers most from extreme weather events? Weather-related loss events in 2017 and 1998 to 2017. Germanwatch, Bonn.
- Edler, D.; Blazejczak, J.; Walz, R.; Ostertag, K.; Eichhammer, W.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Doll, C.; Büchele, R.; Henzelmann, T.; Zelt, T. (2007): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz. Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovationen. Fraunhofer ISI; Roland Berger Strategy Consultants, Dessau.
- Eis, D.; Helm, D.; Laußmann, D.; Stark, K. (2010): Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut (RKI), Berlin.
- Enei, R.; Doll, C.; Klug, S.; Partzsch, I.; Sedlacek, N.; Nesterova, N.; Kiel, J.; Rudzikaite, L.; Papanikolaou, A.; Mitsakis, V. (2010): Vulnerability of Transport systems. Transport Sector Vulnerabilities within the research project WEATHER (Weather Extremes: Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions). Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Erol, S.; Schumacher, A.; Sihn, W. (2016): Industrie 4.0 - Chancen und Risiken einer angekündigten Revolution. Europäische Kommission (Hrsg.) (2011): Innovation für eine nachhaltige Zukunft - Aktionsplan für Öko-Innovationen (Öko-Innovationsplan), Brüssel.

Europäische Kommission (Hrsg.) (2021): Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee and The Committee of the Regions Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change, Brüssel.

European Environment Agency (EEA) (Hrsg.) (2017a): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. EEA Report 1, Luxembourg. doi:10.2800/534806.

European Environment Agency (EEA) (2017b): Energie und Klimawandel. Download unter <https://www.eea.europa.eu/de/signale/die-zukunft-der-energie-in-1/artikel/energie-und-klimawandel#tab-nachrichten-und-artikel>. Stand: 27.08.2019.

European Environment Agency (EEA) (2018): Chemicals for a sustainable future. Report of the EEA Scientific Committee Seminar Copenhagen, 17. May, 2017. European Environment Agency,

European Union Aviation Safety Agency (EASA); European Environment Agency (EEA); EUROCONTROL (Hrsg.) (2019): European Aviation Environmental Report, Kopenhagen, Köln, Brüssel. doi:10.2822/309946.

Fichter, K. (2016): Klimainnovation erfolgreich entwickeln! Ein Leitfaden für den Aufbau regionaler Netzwerke für Innovation und Gründung im Klimawandel. Netzwerk Innovation und Gründung im Klimawandel, Oldenburg.

Fichter, K.; Stecher, T. (2011): Wie Unternehmen den Folgen des Klimawandels begegnen. Chancen und Risiken der Anpassung an den Klimawandel aus Sicht von Unternehmen der Metropolregion Bremen-Oldenburg. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg.

Förster, H.; Lilliestam, J. (2010): Modeling thermoelectric power generation in view of climate change. *Reg Environ Change* 10 (4), S. 327–338. doi:10.1007/s10113-009-0104-x.

Freimann, J.; Mauritz, C.; Walther, M. (2011): Klimaanpassung als Herausforderung für Unternehmen. Empirische Befunde und strategische Optionen.

Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Othlinger, F.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (2014): Taschenbuch der Wasserversorgung 16., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-8348-9805-0.

Ganske, A.; Schade, N. H.; Hüttl-Kabus, S.; Möller, J.; Heinrich, H.; Tinz, B.; Gates, L. (2018): Analyse von Windstau, Wasserstand und Niederschlag für problematische Entwässerungssituationen des Nord-Ostsee-Kanals im Beobachtungszeitraum 1979-2012. BMVI-Expertennetzwerk.

Gaudard, A.; Schmid, M.; Wüest, A. (2017): Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung. *AQUA & GAS* 5 (ARTICLE).

Gawel, E.; Heuson, C. (2012): Ökonomische Grundfragen der Klimaanpassung. *Wirtschaftsdienst* 2012 (7), S. 480–487.

Gebauer, J.; Welp, M.; Lotz, W. (2011): Anpassung an den Klimawandel. Chemieindustrie. Themenblatt: Anpassung an Klimaänderung in Deutschland. Umweltbundesamt (UBA).

Gehrke, B.; Schasse, U. (2017): Die Umweltschutzwirtschaft in Deutschland - Produktion, Umsatz und Außenhandel. Umwelt, Innovation, Beschäftigung 03/2017. Umweltbundesamt (UBA); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin, Dessau-Roßlau.

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) (Hrsg.) (2013): Zukunft Donau. Ergebnisse der Studie "Variantenunabhängige Untersuchungen zum Ausbau der Donau zwischen Straubing und Vilshofen", Bonn, Würzburg.

Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) (Hrsg.) (2018): Verkehrsbericht 2017, Bonn.

GewO: Gewerbeordnung vom 22.11.2019. Ursprünglich gefasst 2019.

- Graaf, L.; Werland, S.; Jacob, K. (2015): Nexus Ressourceneffizienz und Wasser. Eine Analyse der Wechselwirkungen. Umweltbundesamt (UBA); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin.
- Grömling, M. (2017): Deutsche Investitionen im Fokus der internationalen Politik. IW-Kurzbericht 40.2017. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Köln.
- Groth, M.; Brasseur, G. P.; Dreyer, S.; Bergedieck, L.; Albers, J.; Tebbe, S.; Hahn, K.; Paeck, A. (2014): Klimawandelvermeidung und Anpassung im Transport und Logistiksektor Deutschland, Österreich und Schweiz. CDP & CSC Klimawandel Branchenfokus 2014. Climate Service Center (CSC); Carbon Disclosure Project (CDP), Hamburg, Berlin.
- Groth, M.; Cortekar, J. (2015): Die Relevanz von Klimawandelfolgen für Kritische Infrastrukturen am Beispiel des deutschen Energiesektors. Working Paper Series in Economics 335. Leuphana Universität Lüneburg, Institut für Volkswirtschaftslehre, Lüneburg.
- Groth, M.; Rose, J. (2018): Infrastrukturen (Energie- und Wasserversorgung). In: H. von Storch, I. Meinke, M. Claußen (Hrsg) Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Berlin. S. 193–208. doi:10.1007/978-3-662-55379-4_9.
- Günther, E.; Stechemesser, K.; Meyr, J.; Herrmann, J.; Bergmann, A. (2013a): Faktenblatt Verarbeitendes Gewerbe. Das Verarbeitende Gewerbe passt sich an. REGKLAM-Faktenblätter. TU Dresden, Dresden.
- Günther, E.; Stechemesser, K.; Meyr, J.; Herrmann, J.; Bergmann, A. (2013b): Faktenblatt: Hochtechnologie. Die Hochtechnologie passt sich an. REGKLAM-Faktenblätter. TU Dresden, Dresden.
- Hänsel, S.; Brendel, C.; Wehring, S.; Klose, M.; Höpp, S.; Krähenmann, S.; Rauthe, M.; Herrmann, C.; Walter, A. (2018): Evaluation framework and datasets for climate analyses: Supporting adaptation of the German inland transport system. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Hänsel, S.; Herrmann, C.; Jochumsen, K.; Klose, M.; Nilson, E.; Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R. (Hrsg.) (2020): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016-2019. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.
- Hauff, M. von (2013): Abschlussbericht zum Projekt „Klimawandel und Wirtschaft in Rheinland-Pfalz“. Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen, Kaiserslautern, Trippstadt.
- Hellwig, R. T.; Nöske, I.; Brasche, S.; Gebhardt, H.; Levchuk, I.; Bischof, W. (2012): Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund, Berlin, Dresden.
- Henckens, M.; van Ierland, E. C.; Driessen, P.; Worrell, E. (2016): Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy* 49, S. 102–111. doi:10.1016/j.resourpol.2016.04.012.
- Henzelmann, T.; Büchele, R.; Andrae, P.; Wiedermann, A. (2018): GreenTech made in Germany 2018. Umwelttechnik-Atlas für Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin.
- Hertel, M. (2015): Risiken der Industrie 4.0 – Eine Strukturierung von Bedrohungsszenarien der Smart Factory. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 52 (5), S. 724–738. doi:10.1365/s40702-015-0161-1.
- Heymann, E. (2007): Klimawandel und Branchen: Manche mögen's heiß! Aktuelle Themen 388. Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main.
- Heymann, E. (2019): Deutsche Industrie. Wenige Sektoren tragen Investitionswachstum. *Deutschland Monitor*. Deutsche Bank Research, Frankfurt am Main.
- Hillenbrand, T.; Niederste-Hollenberg, J.; Tettenborn, F. (2019): Verbesserung der Wasserqualität durch verringerte Einträge von Spurenstoffen. In: W. Leal Filho (Hrsg) Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele. Berlin, Heidelberg. S. 291–312. doi:10.1007/978-3-662-58717-1_16.

- Hirschfeld, J.; Lindow, M.; Burmeister, A. (2016): Indirekte Effekte des globalen Klimawandels auf die deutsche Wirtschaft. Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Umweltbundesamt (UBA).
- Hirschfeld, J.; Pissarskoi, E.; Schulze, S.; Stöver, J. (2015): Kosten des Klimawandels und der Anpassung an den Klimawandel aus vier Perspektiven. Impulse der deutschen Klimaökonomie zu Fragen der Kosten und Anpassung. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
- Hoffmann, C.; Roethke-Habeck, P.; Biedermann, A.; Koppe, K.; Wlodarski, W.; Hornemann, C.; Naumann, S. (2011): Die Elbe: Schifffahrt und Ökologie im Einklang? Umweltbundesamt (UBA), Dessau.
- Hoffmann, E.; Oels, A.; Hohmann, T. (2019): Klimawandelfolgen in Deutschland - Bereit zu handeln für bessere Vorsorge. Dokumentation des Nationalen Dialogs. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW); Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Hütter, A. (2016): Güterverkehr in Deutschland 2014. Wirtschaft und Statistik (WISTA) (1), S. 47–92.
- Hütz-Adams, F. (2012): Vom Kakaobaum bis zum Konsumenten. Die Wertschöpfungskette von Schokolade, Siegburg.
- Jacob, M. (2019): Digitalisierung & Nachhaltigkeit. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-26217-4.
- Kaiser, T.; Osberghaus, D.; Levermann, A.; Willner, S. (2019): Climate Impact Chains in a Globalized World: a Challenge for Germany (CLIC) 2019.
- Kalberlah, F.; Schwarz, M.; Bunke, D.; Augustin, R.; Oppl, R. (2011): Karzinogene, mutagene, reproduktionstoxische (CMR) und andere problematische Stoffe in Produkten. Identifikation relevanter Stoffe und Erzeugnisse, Überprüfung durch Messungen, Regelungsbedarf im Chemikalienrecht. Texte 18/2011. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Keller, S.; Atzl, A. (2014): Mapping Natural Hazard Impacts on Road Infrastructure—The Extreme Precipitation in Baden-Württemberg, Germany, June 2013. *Int J Disaster Risk Sci* 5 (3), S. 227–241. doi:10.1007/s13753-014-0026-1.
- Kempermann, H.; Millack, A. (2018): Digitale Regionen in Deutschland: Ergebnisse des IW-Regionalrankings 2018. *IW-Trends* 45 (1), S. 49–66. doi:10.2373/1864-810X.18-01-03.
- Klepper, G.; Rickels, W.; Schenker, O.; Schwarze, R.; Bardt, H.; Biebler, H.; Mahammadzadeh, M.; Schulze, S. (2017): Kosten des Klimawandels und Auswirkungen auf die Wirtschaft. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 253–264. doi:10.1007/978-3-662-50397-3_25.
- Koch, H.; Vögele, S.; Hattermann, F.; Huang, S. (2014a): Hydro-climatic conditions and thermoelectric electricity generation – Part II: Model application to 17 nuclear power plants in Germany. *Energy* 69, S. 700–707. doi:10.1016/j.energy.2014.03.071.
- Koch, V.; Kuge, S.; Geissbauer, R.; Schrauf, S. (2014b): *Industrie 4.0 - Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution*. Strategy& PwC, München.
- Kofalk, S.; Wienhaus, S.; Moser, H.; Gratzki, A.; Heinrich, H.; Heyer, H. (2014): Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen: Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung. *Deutsche Beiträge*. 33. Internationaler Schifffahrtskongress, S. 121–133.
- Köppke, K.-E.; Sterger, O. (2013): Grundlagen für die technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS) 310. Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser. Texte 17/2013. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Kowalewski, J.; Stiller, S. (2009): Strukturwandel im deutschen Verarbeitenden Gewerbe. *Wirtschaftsdienst* 89 (8), S. 548–555. doi:10.1007/s10273-009-0966-z.

- Kuehni, C.; Fischer, H.; Schilt, A.; Egger, M.; Habermann-Horstmeier, L.; Kundi, M.; Künzli, N.; Hoffmann, B.; Rössli, M.; Berg-Beckhoff, G.; Blettner, M.; Seidler, A.; Hutter, H.-P. (2018): Materielle Umwelt und Gesundheit. In: M. Egger, O. Razum, A. Rieder (Hrsg) Public Health kompakt. – De Gruyter Studium. Berlin, Boston. S. 267–316. doi:10.1515/9783110466867-010.
- Lindenberger, D.; Bartels, M.; Borggreffe, F.; Bothe, D.; Wissen, R.; Hillebrand, B.; Buttermann, H. G.; Bleuel, M. (2008): Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Berlin.
- Lindgren, J.; Jonsson, D. K.; Carlsson-Kanyama, A. (2009): Climate Adaptation of Railways: Lessons from Sweden. EJTIR 9 (2), S. 164–181.
- Linnerud, K.; Mideksa, T. K.; Eskeland, G. S. (2011): The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply. The Energy Journal 32 (1). doi:10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol32-No1-6.
- Lohrengel, A.-F.; Brendel, C.; Herrmann, C.; Kirsten, J.; Forbriger, M.; Stube, K. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). doi:10.5675/ExpNLA2020.2020.06.
- Lühr, O.; Apfel, D.; Schneider, J. (2011a): Standort- und marktbezogene Betroffenheit der regionalen Wirtschaft durch den Klimawandel. Vulnerability-Assessment der dynaklim-Wirtschaft Teil 2. dynaklim-Publikation 9. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); KLIMZUG, Essen.
- Lühr, O.; Helfenbein, D.; Seefeldt, F.; Deutsch, M.; Tiessen, J.; Lucas, R.; Fekkak, M. (2011b): Evaluierung möglicher Anpassungsmaßnahmen in den Sektoren Energie, Industrie, Mittelstand und Tourismus vor dem Hintergrund der Erarbeitung eines „Aktionsplans Anpassung“ der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Düsseldorf, Berlin, Wuppertal.
- Lühr, O.; Kramer, J.-P.; Lambert, J.; Kind, C.; Savelsberg, J. (2014): Analyse spezifischer Risiken des Klimawandels und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für exponierte industrielle Produktion in Deutschland (KLIMACHECK). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Düsseldorf, Berlin.
- Lutz, C.; Breitschopf, B. (2016): Systematisierung der gesamtwirtschaftlichen Effekte und Verteilungswirkungen der Energiewende. GWS Research Report 2016/01. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS), Osnabrück.
- Mahammadzadeh, M.; Chrischilles, E.; Biebeler, H. (2013): Klimaanpassung in Unternehmen und Kommunen. Betroffenheiten, Verletzlichkeiten und Anpassungsbedarf. IW-Analysen. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Köln.
- Nies, M.; Apfel, D. (2011): Forschungsstand zur Betroffenheit von Branchen und ihre Anpassungsfähigkeit an die Folgen des Klimawandels. Vulnerability Assessment der dynaklim-Wirtschaft Teil 1. dynaklim-Publikation 8. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); KLIMZUG, Essen.
- Nilson, E.; Astor, B.; Bergmann, L.; Fischer, H.; Fleischer, C.; Hاونert, G.; Helms, M.; Hillebrand, G.; Höpp, S.; Kikillus, A.; Labadz, M.; Mannfeld, M.; Razafimaharo, C.; Patzwahl, R.; Rasquin, C.; Rauthe, M.; Riedel, A.; Schröder, M.; Schulz, D.; Seiffert, R.; Stachel, H.; Wachler, B.; Winkel, N. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Nilson, E.; Krahe, P.; Klein, B.; Lingemann, I.; Horsten, T.; Carambia, M.; Larina, M.; Maurer, T. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland: Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_43/2014_4.01.

- Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R.; Bergmann, L.; Ebner von Eschenbach, A.-D.; Forbriger, M.; Hänsel, S.; Hatz, M.; Herrmann, C.; Hillebrand, G.; Lifschiz, E.; Lohrengel, A.-F.; Meine, L.; Nilson, E.; Ork, J.; Schade, N.; Schulz, D.; Stachel, H.; Wachler, B. (2020): Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrsnetzes an den Klimawandel. Schlussbericht des Schwerpunktes 107 "Anpassungsoptionen" im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerkes. BMVI-Expertenetzwerk.
- Ogwu, F. A.; Peters, A. A.; Aliyu, H. B.; Abubakar, N. (2015): An Investigative Approach on the Effect of Air Pollution on Climate Change and Human Health in the Niger Delta Region of Nigeria. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology* 2 (5), S. 37–49.
- Onyanta, A. (2016): Cities, municipal solid waste management, and climate change: Perspectives from the South. *Geography Compass* 10 (12), S. 499–513. doi:10.1111/gec3.12299.
- O'Sullivan, M.; Edler, D.; Lehr, U. (2019): Ökonomische Indikatoren der Energiebereitstellung: Methode, Abgrenzung und Ergebnisse für den Zeitraum 2000-2017. DIW Berlin: Politikberatung kompakt 135, Berlin.
- Ott, H. E.; Richter, C. (2008): Anpassung an den Klimawandel. Risiken und Chancen für deutsche Unternehmen. *Wuppertal Papers* 171. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal.
- Pechan, A.; Rotter, M.; Eisenack, K. (2011): Eingestellt auf Klimafolgen? Ergebnisse einer Unternehmensbefragung zur Anpassung in der Energie- und Verkehrswirtschaft. Schriftenreihe des IÖW 200/11. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin.
- Peckenham, J. M.; Thornton, T.; Whalen, B. (2009): Sand and gravel mining: effects on ground water resources in Hancock county, Maine, USA. *Environ Geol* 56 (6), S. 9. doi:10.1007/s00254-008-1210-7.
- Peter, M.; Guyer, M.; Füssler, J.; Bednar-Friedl, B.; Knittel, N.; Bachner, G.; Schwarze, R.; Unger, M. von (2020): Impact CHAIN: Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland. *Climate Change* 15/2020. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Peter, M.; Guyer, M.; Füssler, J. (2019a): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland. Erster Teilbericht: Die Wirkungsketten in der Übersicht. *Climate Change* 20/2019, Dessau-Roßlau.
- Peter, M.; Guyer, M.; Füssler, J. (2019b): Wie der Klimawandel den deutschen Außenhandel trifft. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Peter, M.; Schwegler, R. (2012): Exposition Österreichs gegenüber den weltweiten Wirkungen des Klimawandels über den Einflusskanal der Warenexporte. *INFRAS*, Zürich/ Wien.
- Pinto, J. G.; Reyers, M. (2017): Winde und Zyklonen. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 67–75.
- Pohlert, T.; Hillebrand, G.; Schäfer, S. (2012): Der Einfluss des Klimawandels auf das Verhalten von Schwermetallen und persistenten organischen Schadstoffen in Gewässerökosystemen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hrsg) *Partikuläre Stoffströme in Flusseinzugsgebieten*. Kolloquium am 20./21. September 2011 in Koblenz - Veranstaltungen 1/2012. Koblenz. S. 5–12.
- Popp, R.; Schüll, E. (Hrsg.) (2009): *Zukunftsforschung und Zukunftsgestaltung. Beiträge aus Wissenschaft und Praxis*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-78564-4.
- PricewaterhouseCoopers (PwC) (Hrsg.) (2020): *Connected and autonomous supply chain ecosystems 2025*, Frankfurt am Main.
- Rhoades, S. A. (1993): The Herfindahl-Hirschman index. *Federal Reserve Bulletin* (Mar), S. 188–189.
- Rohn, A.; Mälzer, H.-J. (2010): Herausforderungen der Klimawandel-Auswirkungen für die Trinkwasserversorgung. *dynaklim-Publikation 3*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); KLIMZUG, Essen.
- Rothstein, B.; Scholten, A. (2014): Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen auf Wirtschaft und Binnenschifffahrt.

Rothstein, B.; Scholten, A. (2016): Navigation on the Danube - Limitations by low water levels and their impacts. JRC Technical Reports. European Commission (EC). doi:10.2788/236234.

Rübbelke, D.; Vögele, S. (2011): Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector. *Environmental Science & Policy* 14 (1), S. 53–63. doi:10.1016/j.envsci.2010.10.007.

Ruf et al. (2015): Climate change, cocoa migrations and deforestation in West Africa: What does the past tell us about the future? *Sustain Sci* 10 (1).

Rupp, R. F.; Vásquez, N. G.; Lamberts, R. (2015): A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings* 105, S. 178–205. doi:10.1016/j.enbuild.2015.07.047.

Rüttiger, L.; Scholl, C.; van Ackern, P.; Rustige, J.; Corder, G.; Golev, A.; Baumgartl, T. (2020a): KlimRes – Impacts of climate change on mining, related environmental risks and raw material supply. Case study on tin mining in Indonesia. Umweltbundesamt (UBA).

Rüttiger, L.; Sharma, V. (2016): Climate Change and Mining. A Foreign Policy Perspective. adelphi, Berlin.

Rüttiger, L.; van Ackern, P.; Leopold, T.; Vogt, R.; Auberger, A. (2020b): Impacts of climate change on mining, related environmental risks and raw material supply. Final report. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Sartorius, C.; Hillenbrand, T.; Niederste-Hollenberg, J. (2019): Multikriterielle Bewertung von Wasserinfrastruktursystemen im Kontext der SDGs. In: W. Leal Filho (Hrsg) Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele. Berlin, Heidelberg. S. 271–289. doi:10.1007/978-3-662-58717-1_15.

Schade, N. H.; Hüttl-Kabus, S.; Ebner von Eschenbach, A.-D.; Hohenrainer, J.; Jensen, C.; Löwe, P.; Möller, J.; Rasquin, C.; Tinz, B.; Wachler, B.; Ganske, A.; Heinrich, H. (2020): Klimaänderungen und Klimafolgebetrachtungen für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich. Schlussbericht des Schwerpunktthemas „Fokusgebiete Küsten“ (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks. BMVI-Expertennetzwerk.

Schade, W.; Peters, A.; Doll, K.; Klug, S.; Köhler, J.; Krail, M. (2011): VIVER – Vision für nachhaltigen Verkehr in Deutschland. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

Schmidt, M. (2015): Energieeffizienz und Klimaschutz mittels Materialeffizienz. *Energy Efficiency and Climate Protection by Material Efficiency Measures*. *Chemie Ingenieur Technik* 87 (4), S. 403–408. doi:10.1002/cite.201400113.

Schoer, K.; Weinzettel, J.; Kovanda, J.; Giegrich, J.; Lauwigi, C. (2012): Raw material consumption of the European Union--concept, calculation method, and results. *Environmental science & technology* 46 (16), S. 8903–8909. doi:10.1021/es300434c.

Scholten, A. (2010): Massenguttransport auf dem Rhein vor dem Hintergrund des Klimawandels. Eine Untersuchung der Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft. Geographische Gesellschaft Würzburg.

Scholten, A.; Rothstein, B.; Baumhauer, R. (2014): Mass-cargo-affine industries and climate change. *Climatic Change* 122 (1-2), S. 111–125. doi:10.1007/s10584-013-0968-0.

Schön, D. (2016): Planung und Reporting. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-08009-9.

Schönfelder, S.; Pütz, T.; Jakubowski, P. (2018): Risikoabschätzung für den Schienengüterverkehr am Beispiel Flusshochwasser Stand: April 2018. Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.

Schroth, G.; Läderach, P.; Martinez-Valle, A. I.; Bunn, C.; Jassogne, L. (2016): Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation. *The Science of the total environment* 556, S. 231–241. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.03.024.

Schubert, M.; Kluth, T.; Nebauer, G.; Ratzenberger, R.; Kotzagiorgis, S.; Butz, B.; Schneider, W.; Leible, M. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Abschlussbericht, Berlin.

- Schwank, O.; Peter, M.; North, N.; Lückge, H.; Kraemer, A.; Görlach, B.; Lange, S.; Nathani, C. (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (Internationale Einflüsse). INFRAS/Ecologic/Rütter + Partner, Zürich/Berlin/Rüschlikon.
- Spainì, C.; Markianidou, P.; Doranova, A. (2018): EU Eco-Innovation Index 2018. Eco-Innovation Observatory; Europäische Kommission.
- Spath, D. (Hrsg.) (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Stuttgart.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018a): Gesamtentwicklung im Außenhandel seit 1950. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018b): Statistisches Jahrbuch 2018. Transport und Verkehr. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2018c): Umwelt. Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserentsorgung 2016. 2.2, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019a): Statistisches Jahrbuch 2019. Transport und Verkehr. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2019b): Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung - Öffentliche Wasserversorgung - 2016, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019c): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen - Teil 2: Energie - Berichtszeitraum 2000 bis 2017. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019d): Verkehr aktuell - Fachserie 8 Reihe 1.1. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019e): Mehr Fracht kommt über die Ozeane. Zahl der Piratenübergriffe auf Seeschiffe ist laut Bundesregierung drastisch zurückgegangen. Pressemitteilung Nr. 280 vom 24. Juli 2019.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2020): Stromabsatz und Erlöse der Elektrizitätsversorgungsunternehmen an Letztverbraucher, Sondervertragskunden und Tarifkunden insgesamt. Statistisches Bundesamt (Destatis). Download unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Verwendung/Tabellen/stromabsatz-haushalt.html#fussnote-1-121128>. Stand: 28.01.2020.
- Stölzle, M.; Blauhut, V.; Kohn, I.; Krumm, J.; Weiler, M.; Stahl, K.; Hennegriff, W.; Foltyn, M.; Iber, C.; Fink, G. (2018): Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen. KLIWA-Berichte (23).
- Storch, H. von; Meinke, I.; Claußen, M. (Hrsg.) (2018): Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Springer Spektrum, Berlin.
- Straff, W.; Mücke, H.-G. (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bonn.
- Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) (Hrsg.) (2020): Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Overview.
- Tenggren, S.; Olsson, O.; Vulturius, G.; Carlsen, H.; Benzie, M. (2020): Climate risk in a globalized world: empirical findings from supply chains in the Swedish manufacturing sector. *Journal of Environmental Planning and Management* 63 (7), S. 1266–1282. doi:10.1080/09640568.2019.1660626.
- Tirana, F.; Küpfer, K.; Taboada-Gomez, V.; Kaiser, T.; Hauer, M.; Kind, C. (2021): Cocoa and Chocolate. Case Study within work package 4 of the CLIC project. adelphi; Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

- Tröltzsch, J.; Görlach, B.; Lückge, H.; Peter, M.; Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2011): KomPass Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. Verkehr, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017): Endenergieverbrauch 2017 nach Sektoren und Energieträgern. Umweltbundesamt (UBA); AG Energiebilanzen e.V. (AGEB).
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2018): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2018, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019a): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftqualität in Innenräumen. Stellungnahme der Kommission Innenraumluftthygiene (IRK) am Umweltbundesamt. Bundesgesundheitsbl 2 (62), S. 232–234.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019b): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2020): Addressing climate change impacts in mining and raw material supply chains. Recommendation paper, Dessau-Roßlau.
- United Nations Statistics Division (UNSD) (2019): Classification on economic statistics. United Nations Statistics Division (UNSD). Download unter <https://unstats.un.org/unsd/classifications/Econ>. Stand: 13.09.2019.
- van Bergen, B.; Soonawala, L.; Wälzholz, G. (2008): Climate Changes Your Business. KPMG's review of the business risks and economic impacts at sector level. KPMG International.
- Verband der Wirtschaft für Emissionshandel und Klimaschutz e.V. (co2ncept plus); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2019): Klimarisikomanagement 2050 - Betriebliche Klimarisikostategie Step-by-Step entwickeln. Leitfaden, München.
- Vereinte Nationen (2008): International Standard industrial classification of all economic activities (ISIC) Rev. 4. United Nations, New York.
- Vereinte Nationen (2018): Classification by Broad Economic Categories. Defined in terms of the Harmonized Commodity Description and Coding System (2012) and the Central Product Classification, 2.1 Revision 5. United Nations, New York.
- Voigt, K.-I.; Steven, M.; Frhr. von Weizsäcker, Robert K.; Horvath, M. (2018): Produktionsprozess. Ausführliche Definition. Download unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/produktionsprozess-45377/version-268671>.
- Vonk, M.; Bouwman, A.; van Dorland, R.; Eerens, H. (2015): Worldwide climate effects. Risks and opportunities for the Netherlands. PBL Environmental Assessment Agency, The Hague.
- Voß, R.; Hartmann, F. (2010): Innovative Klimafolgenanpassung als Chance für die mittelständische Wirtschaft. In: L. Ungvári (Hrsg.) Wissenschaftliche Beiträge 2009 | 2010. Erkenntnisse. Konzepte. Projekte. Wildau. S. 107–113.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (Hrsg.) (2007): Vergleich der Verkehrsträger Schiff, Straße, Schiene (verkehrswirtschaftlich und ökologisch). PLANCO Consulting GmbH; Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Magdeburg.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (Hrsg.) (2019): Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung 2018, Bonn.

Weimer-Jehle, W.; Prehofer, S.; Hauser, W. (2015): Kontextszenarien der deutschen Energiewende: eine Datenerhebung zur Analyse gesellschaftlich-politischer Rahmenbedingungen einer sozio-technischen Transformation. doi:10.18419/OPUS-5693.

Wienert, U.; Walter, A. (2011): Klimawandel und Bauen. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg) Klimastatusbericht 2011. Offenbach. S. 5–16.

Willner, S. N.; Otto, C.; Levermann, A. (2018): Global economic response to river floods. *Nature Clim Change* 8 (7), S. 594–598. doi:10.1038/s41558-018-0173-2.

World Customs Organization (WCO) (2018): The Harmonized System. A universal language for international trade. World Customs Organization (WCO), Brüssel.

World Health Organization (WHO) (2018): Ambient (outdoor) air pollution.

Zacharias, S.; 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. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Zanker, C. (2018): Branchenanalyse Logistik. Der Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel, Düsseldorf.

3 Handlungsfeld Tourismuswirtschaft

Autoren: Luise Porst, Manuel Linsenmeier, Lukas Dorsch, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin

3.1 Ausgangslage

3.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Unter Tourismus werden nach internationaler Definition Aktivitäten von Reisenden verstanden, welche ein Hauptziel außerhalb ihrer gewohnten Umgebung für den Aufenthalt zu Freizeit-, Geschäfts- oder anderen persönlichen Zwecken für weniger als ein Jahr aufsuchen (UNWTO 2010). Neben dem Reisezweck spielt die Reisedauer für die weitere Differenzierung des Tourismus eine wichtige Rolle (BMW 2017b). Hier kann zwischen Tagesausflüglern und Übernachtungsgästen unterschieden werden. Nach international üblichen Definitionen („International Recommendations for Tourism Statistics“) werden Tagesgäste als „Besucher“ und nicht als „Touristen“ bezeichnet, ihre Aktivitäten werden jedoch zum Tourismus hinzugezählt (UNWTO o.J.; UNWTO 2010). Aus den verschiedenen Unterscheidungen von Tourismusarten nach Reisezweck, -dauer, -aktivität ergeben sich auch verschiedene Sensitivitäten im Zusammenhang mit klimatischen Einflüssen. Im Mittelpunkt der Betrachtung des Handlungsfelds Tourismuswirtschaft im Rahmen der KWRA 2021 steht der Urlaubs-, Freizeit- und Gesundheitstourismus¹⁵ in Deutschland sowohl von in Deutschland ansässigen als auch von ausländischen Reisenden. Reisen aus Deutschland ins Ausland sind nicht Teil der Analyse. Berücksichtigt werden Reisen, die Übernachtungen beinhalten.

Tourismus ist in Deutschland wirtschaftlich bedeutend. Als Querschnittsbranche umfasst die Tourismuswirtschaft Reiseveranstalter, Reisebüros und Beherbergungseinrichtungen sowie Verkehrs-, Gastronomie-, Gesundheits-, Sport-, Freizeit-, Kultur- und Erholungsdienstleistungen (UBA 2018). Die Zahl der Übernachtungen in Deutschland stieg von 2006 bis 2016 kontinuierlich von 351,2 Millionen auf 447,2 Millionen an, während die durchschnittliche Aufenthaltsdauer aufgrund zunehmender Kurz-, Wochenend- und Städtereisen in den letzten Jahren leicht rückläufig war (von 2,8 Tagen im Jahr 2012 auf 2,7 Tage im Jahr 2017) (BMW 2017a). Wertschöpfung und Arbeitsplätze im deutschen Tourismussektor stiegen zwischen 2010 und 2015 von 97 Milliarden Euro und 2,86 Millionen Beschäftigten auf 105,3 Milliarden Euro und 2,92 Millionen Beschäftigte. Die Tourismuswirtschaft trug damit im Jahr 2015 direkt mit einem Anteil von 3,9 Prozent (105,3 Milliarden Euro) zur Gesamtwertschöpfung und mit einem Anteil von 6,8 Prozent (2,92 Millionen Jobs) zur Beschäftigung bei (BMW 2017b). Zusätzlich zu diesen direkten Effekten waren im Jahr 2015 indirekte Effekte auf Bruttowertschöpfung und Beschäftigung im Umfang von 76,1 Milliarden Euro beziehungsweise 1,25 Millionen Erwerbstätige zu verzeichnen (BMW 2017b). Inklusive indirekter und induzierter Effekte trug die Tourismuswirtschaft 2010 zu 12 Prozent der Beschäftigung und zu 9,7 Prozent der Gesamtwertschöpfung in Deutschland bei (BMW 2012).

Die Demographie spielt eine wichtige Rolle für langfristige Entwicklungen im Tourismus. Soziodemographische Merkmale, welche das Angebot, die Nachfrage und die Arbeitsmarktsituation in der Tourismuswirtschaft beeinflussen, sind unter anderem die Bevölkerungsentwicklung, Bevölkerungswanderungen, die Altersstruktur, das Geschlecht, die Bildungsstruktur, die Haushaltsstruktur und das Haushaltseinkommen (Grimm et al. 2009). Außerdem spielt die gesamtwirtschaftliche Situation eine Rolle. Das (auf robustem Nachfrageniveau) stagnierende Reiseaufkommen

¹⁵ Gewiss ist insbesondere der Gesundheitstourismus nicht in jedem Fall witterungsbeeinflusst ist. Da sich (zunehmende) Hitze aber auf den Gesundheitstourismus auswirken kann, wird dies im Rahmen der Analyse auch betrachtet.

in Deutschland zwischen 2008 und 2010 kann beispielsweise mit der ungünstigen wirtschaftlichen Situation im selben Zeitraum in Verbindung gebracht werden. Für die touristische Nachfrage ist insbesondere die zunehmende Alterung der Gesellschaft von Bedeutung (Karl et al. 2015; Lohmann 2015). Der größere Anteil von Menschen höherer Altersgruppen (über 55 Jahre beziehungsweise 65 bis 74 Jahre) an der Gesamtbevölkerung lässt eine zunehmende touristische Nachfrage in bestimmten Bereichen vermuten. Dafür spricht die Zunahme der Reiseintensität, die in der Altersgruppe 65 bis 74 Jahre am stärksten ausgeprägt war (Reinhardt 2019). Zu den besonders nachgefragten Bereichen zählen beispielsweise der Natur- oder Kulturtourismus, während beispielsweise für den Winter(sport)tourismus eher ein Rückgang erwartet werden kann (Grimm et al. 2009; Bausch et al. 2016; Reinhardt 2019).

Da das touristische Angebot in Deutschland zu einem nicht unerheblichen Teil Freizeitaktivitäten im Freien umfasst, ist der deutsche Tourismussektor in vielfältiger Weise vom Wetter abhängig. Zu den wichtigsten klimatischen Einflüssen gehören unter anderem Schneesicherheit, Hitze und Trockenheit sowie Extremereignisse wie Starkregen, Überflutungen und Sturm. In Deutschland ist der Wintertourismus vor dem Hintergrund des Klimawandels besonders starken Veränderungen unterworfen, da er vergleichsweise stark auf eine bestimmte Witterung angewiesen ist (Abegg et al. 2007; Heucheles et al. 2014; Bausch et al. 2016). So ist infolge Klimawandel-bedingter Temperaturerhöhungen im Winter und Frühling mit einer Abnahme der Schneesicherheit in Mittel- und Hochgebirgsregionen zu rechnen, was schneegebundene Tourismusformen einschränkt und charakteristische Winterlandschaften verändert (Bausch et al. 2016; Matzarakis und Lohmann 2017).

Die Vulnerabilität der Tourismuswirtschaft gegenüber Hitze ist ambivalent. Während Wärme für bestimmte Tourismussektoren in Deutschland zu einer höheren Nachfrage führen könnte (zum Beispiel durch eine Verlängerung der Bade- oder Wandersaison) (Heucheles et al. 2014; Strasdas und Zeppenfeld 2016), bergen zunehmende Hitzeereignisse und die daraus resultierenden Folgen für Gesundheit und Wohlbefinden neben Chancen auch Risiken, zum Beispiel für bestimmte Angebote des Städte- oder Kurtourismus (Matzarakis und Lohmann 2017).

Zunehmende Trockenheit kann zu weiteren Einschränkungen führen. Dürre oder Hitze- und Trockenheits-bedingte Waldbrände können beispielsweise einen attraktivitätsmindernden Einfluss auf das Landschaftsbild haben. Da landschaftliche Attraktivität als eines der Kriterien für die Wahl der Reisedestination gelten kann, beeinflussen solche Erscheinungen auch den Tourismus (Abegg 1996; Thomas et al. 2013; Heucheles et al. 2014). Des Weiteren kann Niedrigwasser in Flüssen und Talsperren den Boots- und Schifffahrtstourismus beeinträchtigen. Beispiele für weitere Auswirkungen von Trockenheit auf den Tourismus sind Betretverbote von Wäldern wegen erhöhter Waldbrandgefahr, Sperrungen von Verkehrsinfrastrukturen aufgrund von Waldbränden oder Wassermangel auf Berghütten (Hahne et al. 2012).

Aufgrund der Vielzahl an Faktoren, welche die Tourismuswirtschaft beeinflussen, besteht ein Bezug zu etlichen anderen Handlungsfeldern. So können beispielsweise Schäden an Ökosystemen (Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“) und naturräumliche Schäden an Küsten (Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) zu einer Veränderung oder einem lokalen Wegfall touristischer Angebote führen. Sturmfluten (Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“), Flusshochwasser und -niedrigwasser (Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“), Sturzfluten (Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“), Sturmschäden und Waldbrände (Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“) und gravitative Massenbewegungen (Handlungsfeld „Boden“) können zu Schäden an touristischen Infrastrukturen und zu Betriebsunterbrechungen führen. Plötzliche Extremereignisse wie starke Stürme sind zudem eine Gefahrenquelle für Touristen und Infrastruktur. Auch Beeinträchtigungen der biologischen Wasserqualität (Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“, Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“), schädliche

Mikroorganismen (Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“) und Hitzebelastung (Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“) sind mit potenziellen Auswirkungen auf die Tourismuswirtschaft verbunden.

3.1.2 Neuere Entwicklungen

Wie eingangs erwähnt, konzentriert sich die Betrachtung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ im Rahmen der KWRA 2021 auf Urlaubs- und Freizeittourismus innerhalb Deutschlands. Zu unterscheiden sind dabei die Angebots- und die Nachfrageseite. Nachfrageseitig wird die Perspektive von Reisenden innerhalb Deutschlands eingenommen, was ausländische Reisende nach beziehungsweise innerhalb Deutschlands einschließt. Bezüglich der für die Tourismuswirtschaft relevanten Klimawandelphänomene (klimatische Einflüsse, räumliche Exposition und Sensitivität) wird nur Deutschland betrachtet. Dementsprechend wird beispielsweise die (mit dem Klimawandel und weiteren Wechselwirkungen zusammenhängende) Beeinflussung der Nachfrageseite außerhalb Deutschlands nicht in die Analyse einbezogen. Auch Auslandsreisen und Geschäftsreisetourismus stellen keinen Analyseschwerpunkt dar (weder angebots- noch nachfrageseitig). Letzterer spielt im Rahmen der Auseinandersetzung mit klimawandelverknüpften wirtschaftlichen und infrastrukturellen Implikationen in Deutschland eine Rolle, welche im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ und im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ adressiert werden.

Die Reiseintensität, das heißt, Personen (Anteil der Bevölkerung), die pro Jahr mindestens eine Reise von mindestens fünf Tagen unternehmen, lag in Deutschland in den letzten Jahren kontinuierlich bei 77 Prozent, im Jahr 2018 waren 78 Prozent zu verzeichnen, zuzüglich Kurzreisen (weniger als fünf Tage Reisedauer) (Sonntag und Lohmann 2019; Statista 2019). Zwar liegen die Destinationen bei drei Viertel der von der deutschen Bevölkerung getätigten Reisen im Ausland. Gleichzeitig fällt die Wahl bei ein Viertel der Reisen (was knapp 19 Millionen Reisen entspricht) auf Ziele innerhalb Deutschlands (Sonntag und Lohmann 2019). Auch die durchschnittlichen Ausgaben für Tourismus pro Bürger sind in Deutschland in den letzten zehn Jahren tendenziell angestiegen (Reinhardt 2019).

Im Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) wurden bislang keine signifikanten klimabedingten Veränderungen beim inländischen Urlaubs- und Kurzurlaubstourismus festgestellt (UBA 2019). Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist teils von Beeinträchtigungen für die Tourismuswirtschaft auszugehen, wie beispielsweise die abnehmende Schneesicherheit (Abegg et al. 2013), Infrastruktur-gefährdende Extremereignisse, größere Hitzebelastung und höhere Luftfeuchte in bestimmten auch für den Gesundheitstourismus relevanten Gebieten oder eine mit höheren Wassertemperaturen einhergehende Verschlechterung der Bade-/Küstengewässerqualität, zum Beispiel durch das verstärkte Auftreten von Blaualgen und Quallen (Matzarakis und Tinz 2014). Gleichzeitig ist auch mit Tourismus-förderlichen Veränderungen zu rechnen, wie beispielsweise die Verlängerung der Sommersaison in Südwestdeutschland, die Ausweitung der Badesaison durch die Zunahme der Tage mit thermischer Eignung an der deutschen Ostsee- und Nordseeküste, eine leichte Zunahme an Tagen ohne Niederschlag (wobei gleichzeitig eine Zunahme an Tagen mit viel Niederschlag zu erwarten ist) (Matzarakis und Tinz 2014). Offen ist allerdings, ob diese Veränderungen tatsächlich zu einer Steigerung der touristischen Nachfrage oder lediglich zu einer anderen Verteilung des Tourismusaufkommens führen werden. Zu beachten ist auch, dass in besonders nachgefragten Destinationen, etwa an Küsten oder in den Bergen, Maßnahmen zur Reduktion der Gäste zur Hochsaison erwogen werden, um den Nutzungsdruck auf Natur und Umwelt zu reduzieren (Balaš und Strasdas 2019; Kirstges 2021). Für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts sind starke und entsprechend Tourismuswirtschaft-relevante klimatische Veränderungen zu erwarten (Brasseur et al. 2017). Gleichzeitig gilt dabei zu bedenken,

dass für das touristische Angebot und die touristische Nachfrage nicht ausschließlich klimatische Faktoren eine Rolle spielen. Aufgrund der Multikausalität bei Reiseentscheidungen oder Angebotsveränderungen ist das Gewicht des klimatischen Einflusses nur schwer identifizierbar (Bausch et al. 2019; UBA 2019).

3.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Einige touristische Angebote setzen relativ spezifische Witterungsbedingungen beziehungsweise klimatische Gegebenheiten voraus (Heuchele et al. 2014; Schwirplies und Ziegler 2017). Dazu zählen beispielsweise der Wintertourismus oder der Gesundheitstourismus. In diesen Tourismussegmenten können starke klimatische Veränderungen mit deutlichen Einschränkungen des Angebots und teilweise mit dessen Wegfall einhergehen (Matzarakis und Lohmann 2017). Auch führen witterungsbedingte Ereignisse in Deutschland immer wieder zu Schäden an touristischen Infrastrukturen und Unterbrechungen des Betriebs von touristischen Einrichtungen (Brasseur et al. 2017). An der Küste sind dies insbesondere Stürme sowie Unterbrechungen von Badeaktivitäten aufgrund schädlicher Mikroorganismen, deren Wachstum von hohen Wassertemperaturen profitiert. In anderen Regionen sind Unterbrechungen in Folge von Starkniederschlägen, Trockenheit oder Flusshochwassern und -niedrigwassern vergleichsweise häufig anzutreffen. Darüber hinaus können bestimmte thermische, ästhetische und physikalische Aspekte des Tourismus-Klimas das Reise- und Urlaubserlebnis in besonderer Weise prägen (Bausch et al. 2016; Matzarakis und Tinz 2014). Zum Beispiel können ausbleibender Schnee oder Trockenheit das Landschaftsbild verändern und Kältereize, welche von vielen Touristen mit Wintererfahrung assoziiert werden, abnehmen (Endler und Matzarakis 2011; Lühr et al. 2011; Bausch et al. 2016; Matzarakis und Lohmann 2017). Langfristige klimatische Trends können somit zu einer Verlagerung der Nachfrage führen und die Reisezeit, das Angebot oder die Reisedestination verändern (Matzarakis und Lohmann 2017). Zusammengenommen ergeben sich aus Änderungen des Angebots und der Nachfrage wiederum wirtschaftliche Chancen und Risiken für einzelne Tourismusanbieter sowie Destinationen.

Im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ wurden insgesamt vier Klimawirkungen zur Bearbeitung ausgewählt. Eine Klimawirkung wurde bei der Bearbeitung stärker spezifiziert. Dabei wurden als besonders stark vom Klima abhängige Tourismusarten Wintertourismus und Gesundheitstourismus ausgewählt (Tabelle 33).

Tabelle 33: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Einschränkungen touristischer Angebote	Intensive Bearbeitung Spezifizierung: 1) Auswirkungen fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus 2) Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus
Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen	Extensive Bearbeitung
Verlagerung der Nachfrage	Extensive Bearbeitung
Wirtschaftliche Chancen und Risiken für Tourismusanbieter	Extensive Bearbeitung
Landschaftsbild	Nicht ausgewählt

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Kosten für Reisende	Nicht ausgewählt
Hauptreisezeiten	Nicht ausgewählt

3.2 Klimawirkungen im Detail

3.2.1 Einschränkungen touristischer Angebote

Wetter- und klimaabhängige touristische Angebote sind in besonderem Maße von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Zu diesen Tourismusangeboten gehören in Deutschland vor allem der Wintertourismus (das heißt, von winterlichem, kaltem Wetter und damit verbundener Phänomene abhängiger Tourismus) und an bestimmte bioklimatische Ausprägungen gebundene Angebote des Gesundheitstourismus. Beispielsweise sind schneeabhängige Wintersportarten bei langanhaltenden Temperaturen über dem Gefrierpunkt und heilklimatische Kurangebote bei Hitzebelastungen nicht mehr möglich. Für die Spezifizierung der Klimawirkung wurden diese zwei Aspekte – Schneesicherheit für den Wintertourismus und Hitzebelastung für den Gesundheitstourismus – ausgewählt. Auf sie wird in den folgenden Abschnitten 3.2.1.1 und eingegangen.

Für die Untersuchung der vorliegenden Klimawirkung wurde von einer unveränderten Nachfrage ausgegangen. Auf die möglichen Folgen der Einschränkungen klimasensitiver Angebote und einer sich voraussichtlich ändernden Nachfrage für betroffene Destinationen wird bei den Klimawirkungen „Verlagerung der Nachfrage“ und „Wirtschaftliche Chancen und Risiken für Tourismusanbieter“ eingegangen.

3.2.1.1 Auswirkungen fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus

Hintergrund und Stand der Forschung

Sowohl angebots- als auch nachfrageseitig sind in Deutschland Wintertourismus und das Vorhandensein von Schnee eng miteinander verflochten. Bezogen auf den gesamten Wintertourismus hängt die erforderliche Schneesicherheit von der Nutzung des Gebiets ab. Besonders für die Regionen Mittelgebirge und Alpen ist das Vorhandensein von Schnee für eine Winterlandschaft zentral. Beispielsweise ist für mehr als zwei Drittel der Interessenten an innerdeutschen Winterurlaubsreisen (die mindestens fünf Tage umfassen) Schnee die wichtigste Erwartung an ihren Urlaubsort (Bausch et al. 2016). Insbesondere für klassische Wintersportarten wie Alpinski-, Snowboard- oder Langlauffahren ist (angebotsseitig) das Vorhandensein von natürlichem oder künstlichem Schnee eine notwendige Bedingung. Für manche Aktivitäten, wie winterliche Spaziergänge und Wanderungen, ist Schnee hingegen lediglich eine Bedingung, die zur Attraktivität eines Urlaubsortes beiträgt. Bergwanderungen können beispielsweise auch bei sonniger Höhenwetterlage attraktiv sein und nachgefragt werden. Eine Reduzierung der Schneesicherheit führt somit auch nicht direkt zur Einschränkung dieses touristischen Angebots. Für klassische Wintersportarten wie Alpinski-, Snowboard- oder Langlauffahren ist das Vorhandensein von natürlichem oder künstlichem Schnee hingegen eine notwendige Bedingung. Unter den winterlichen Tourismusangeboten hat der schneegebundene Wintersporttourismus daher die höchsten Anforderungen an die Schneesicherheit. In den Küstenregionen ist für den Tourismus eher das Vorhandensein einer „Winteratmosphäre“ förderlich. Ein Kriterium dafür ist ebenfalls das Vorhandensein von Schnee, wobei dabei geringere Schneehöhen (zum Beispiel \geq drei Zentimeter) ausreichen.

Der entscheidende Faktor für den Wintertourismus in Deutschland in einem allgemeineren Sinn – das heißt, über den Wintersporttourismus hinausgehend – ist das Vorhandensein einer Winteratmosphäre beziehungsweise einer Winterlandschaft. Damit beschränkt sich die Betrachtung nicht auf Skigebiete. Für das Vorhandensein einer Winteratmosphäre sind insbesondere niedrige Temperaturen ausschlaggebend sowie das grundsätzliche Vorhandensein von Schnee (also nicht in einer bestimmten Menge beziehungsweise Höhe). Für das winterliche Landschaftsbild reichen relativ geringe Schneehöhen aus (circa zehn Zentimeter beziehungsweise auch darunter, das heißt, \geq drei Zentimeter) (Bausch und Unseld 2018).

Während Regen als besonders beeinträchtigend für den Wintertourismus gilt, wirken sich sonnige Tage, niedrige Temperaturen und Niederschlag in Form von Schnee positiv aus. Mit zunehmender Höhe steigt die Schneesicherheit. Die Höhengrenze, ab der Gebiete als natürlich schneesicher betrachtet werden, liegt gegenwärtig bei etwa 1500 Meter und erhöht sich mit jedem Grad Celsius Temperaturanstieg um etwa 150 Meter (Endler und Matzarakis 2010). Die Höhe einer Region beziehungsweise eines Skigebiets beeinflusst daher die Sensitivität gegenüber Klimaveränderungen. Durch ihre Höhenlage sind Mittelgebirge besonders von einer klimawandelbedingten Abnahme der Schneesicherheit betroffen. Selbst der höchste Berg der deutschen Mittelgebirge, der Feldberg im Schwarzwald, liegt unter der heutigen Schneesicherheitsgrenze von 1500 Meter, weshalb sich bereits geringe Temperaturerhöhung negativ auf die wintertouristischen Möglichkeiten der Region auswirken und zu einem Wegfall von Angeboten führen können (Endler und Matzarakis 2011; Matzarakis und Lohmann 2017).

Nach Abegg (2012) ist zwischen natürlicher und technischer Schneesicherheit zu unterscheiden. Während sich die natürliche Schneesicherheit auf das Vorkommen von Naturschnee bezieht¹⁶, schließt die technische Schneesicherheit die Nutzung künstlicher Beschneigung mit ein. Für die technische Schneesicherheit ist das Vorkommen von aufeinanderfolgenden Eistagen (Tage mit Tageshöchsttemperaturen unter null Grad Celsius) entscheidend, da eine Beschneigung in der Nacht wenig sinnvoll ist, wenn der Schnee tagsüber wieder schmilzt (Bausch et al. 2016). In den alpinen Skigebieten Deutschlands kommt mittlerweile fast flächendeckend künstliche Beschneigung zum Einsatz, weshalb dort insbesondere die technische Schneesicherheit von Bedeutung ist (Matzarakis und Lohmann 2017). Die natürliche Schneesicherheit der größten Skigebiete in den Bayerischen Alpen (mit Ausnahme der Zugspitze) war bereits im Zeitraum von 1971 bis 2000 stark eingeschränkt (Mayer und Steiger 2013). In den deutschen Mittelgebirgen wird Kunstschnee bisher nur in manchen Gebieten eingesetzt (Schmidt et al. 2012).

Die Beschneibarkeit ist neben klimatischen auch operativen Limitierungen unterworfen und zudem durch Fragen der Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz begrenzt. So ist beispielsweise der Betrieb von Beschneigungsanlagen auf bestimmte Zeiten beschränkt und deren Genehmigung an die Prüfung von wasser- und naturschutzrechtlichen Fragestellungen geknüpft, da die künstliche Schneeerzeugung Folgen für den Wasser- und Naturhaushalt und für das Landschaftsbild nach sich ziehen kann (BayWG 2019; Mayer und Steiger 2013). Aufgrund des hohen Wasser- und Energieverbrauchs ist Beschneigung teils vor Ort entsprechend umstritten und kann bei Abnahme von lokalen Wasserressourcen zu weiteren Nutzungskonflikten mit anderen Sektoren führen (Kropp et al. 2009; UBA 2015). Die Akzeptanz von Kunstschnee hängt sowohl von der Bereitschaft der Touristen ab, die Kosten der künstlichen Beschneigung mitzutragen als auch von der Haltung zu künstlichen Schneepisten inmitten schneefreier Landschaft. Die wenigen vorhandenen Studien zur Akzeptanz von Kunstschnee weisen diesbezüglich bisher keinen eindeutigen Trend aus (Abegg et al. 2013). Wissenschaftlich belegt werden konnte jüngst aber, dass die Qualität des technisch hergestellten Schnees die Akzeptanz beziehungsweise die Zufriedenheit der

¹⁶ Skigebiete können als schneesicher definiert werden, wenn in mindestens sieben von zehn Jahren länger als 100 Tage eine Schneedecke von über 30 Zentimeter gegeben ist (Abegg 2012).

Gäste beeinflusst. In der Regel wird bei zu nassem und schwerem Schnee in höhere Lagen ausgewichen, um wintersportlichen Aktivitäten nachzugehen, was dort wiederum zu Überfüllungseffekten führen kann. Zusätzlich sind die Ausweichmöglichkeiten in höhere Lagen in deutschen Skigebieten – natürlicherweise – eingeschränkt (Bausch et al. 2019).

Zielsystem der spezifizierten Klimawirkung

Das Zielsystem stellt das Gerüst der Kategorisierung der einzelnen Faktoren und schließlich der Klimawirkung dar (Tabelle 34). Es wird hier aus der Perspektive des touristischen Angebots formuliert; gleichzeitig findet die Nachfrageseite Berücksichtigung, da bei der Klimawirkung die Einschränkungen im Mittelpunkt stehen, wovon Anbieter- und Nachfrageseite gleichermaßen betroffen sind (wenngleich sich die Spezifika der jeweiligen Einschränkungen je nach Seite unterscheiden).

Tabelle 34: Zielsystem der spezifizierten Klimawirkung „Auswirkungen fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus“

Kategorie	Bezeichnung	Kriterien	Beschreibung der Kategorie
3	Starke Klimawirkung	Längerfristige Beeinträchtigung, häufige Minderung der Funktionsfähigkeit, hohe wirtschaftliche Schäden	Das touristische Angebot kann nicht mehr angeboten werden.
2	Mittlere Klimawirkung	Längerfristige leichte Beeinträchtigung, gelegentliche Minderung der Funktionsfähigkeit, mittlere wirtschaftliche Schäden	Das touristische Angebot kann (ohne zusätzliche staatliche Unterstützung) mit leichter Beeinträchtigung der Qualität und/oder nur noch in deutlich kürzeren Zeiträumen und/oder nur noch in deutlich geringerem Umfang angeboten werden.
1	Geringe Klimawirkung	Keine oder kaum längerfristige Beeinträchtigung, seltene Minderung der Funktionsfähigkeit, geringe wirtschaftliche Schäden	Das touristische Angebot kann (ohne zusätzliche staatliche Unterstützung) mit geringer Beeinträchtigung der Qualität und/oder nur noch in kürzeren Zeiträumen und/oder nur noch in geringerem Umfang angeboten werden.
0	Neutrale/keine Klimawirkung	Keine längerfristige Beeinträchtigung, sehr seltene oder gar keine Minderung der Funktionsfähigkeit, keine signifikanten wirtschaftlichen Schäden	Das touristische Angebot kann (ohne zusätzliche staatliche Unterstützung) ohne Beeinträchtigung der Qualität und ohne zeitliche Einschränkungen und im bisherigen Umfang angeboten werden.

Grundlage der Operationalisierung

Der Faktor Schneesicherheit wurde mithilfe des Indikators „Mittlere Anzahl potenzieller Schneetage im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar“¹⁷ operationalisiert. Darunter fallen Niederschlagstage, deren Tagesmitteltemperatur bei \leq zwei Grad Celsius liegt. Die Daten basieren auf Klimaprojektionen des Deutschen Wetterdienstes.

¹⁷ Der Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar wurde im Rahmen des Workshops (im Sommer 2019) zum Handlungsfeld Tourismus unter Beteiligung der fachlich begleitenden Experten und Expertinnen als der für die Tourismuswirtschaft in Deutschland in der Wintersaison relevanteste Zeitraum identifiziert (unter anderem unter Berücksichtigung des aktuellen Wissensstands zu Reisezeiträumen, Reiseentscheidungen beziehungsweise Tourismustypen bezogen auf den Wintertourismus in Deutschland).

Als weiterer Indikator für den Faktor Schneesicherheit wurde das Datum der ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage im Winter verwendet. Dabei handelt es sich um das Datum des ersten Tages im Winter, der als Eistag auf zwei vorhergehende Eistage folgt. Ausschlaggebend ist dabei die Maximumtemperatur „tasmax < null Grad Celsius“. Diese Daten beruhen ebenfalls auf Klimaprojektionen des Deutschen Wetterdienstes.

Bei der Operationalisierung des Faktors Winterlandschaft/Winteratmosphäre wurde folgendermaßen vorgegangen¹⁸: Ausgangspunkt für den Indikator des Einflussfaktors "Winterlandschaft oder Winteratmosphäre" sind Ergebnisse von Wasserhaushaltssimulationen, die mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen für das RCP8.5-Szenario durchgeführt wurden (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“). Dieses Modell simuliert alle Wasserhaushaltsgrößen inklusive Schnee in täglicher Auflösung auf einem fünf mal fünf Kilometer Raster für das gesamte Bundesgebiet.

Das in LARSIM-ME bezüglich des Schnees implementierte Prozessgeschehen gliedert sich in die Teilprozesse Akkumulation, Verlagerung und Schmelze. Der Schneemassenaufbau ist sehr sensitiv gegenüber Reliefparametern (Geländehöhe, Gefälle). Im eigentlichen LARSIM-ME-Raster von fünf mal fünf Kilometer werden diese nicht in ausreichendem Detail abgebildet. Um die Höhenverteilung und damit die vertikalen Temperaturgradienten realistischer wiederzugeben, wurde speziell für die Schneemodellierung eine Höhenzonierung innerhalb jeder Rasterzelle auf Basis eines 90 mal 90 Meter auflösenden Geländemodells vorgenommen. Bei der Schneeakkumulation wird keine harte Grenztemperatur vorgegeben, sondern eine Temperaturspanne, die Schnee-Regengemische zulässt und somit eine Wasserabgabe aus der Schneedecke auch an "Schneetagen" erlaubt. Bei der Berechnung der Schneeschmelze kommt das Grad-Tag-Verfahren zum Einsatz, das die Energiebilanz der Schneedecke relativ einfach approximiert. Bei der tatsächlichen Wasserabgabe der Schneedecke wird die Lagerungsdichte der Schneedecke nach dem Bertle-Verfahren berücksichtigt. In sehr hoch gelegenen Gebieten wird in der Realität in der Jahressumme mehr Schnee auf- als abgebaut. Infolgedessen wird in diesen Bereichen Schnee und Eis in fester Form talwärts verfrachtet. Diese Prozesse werden in LARSIM-ME ebenfalls überschlägig erfasst. Trotz der konzeptionellen Umsetzung des Prozessgefüges gibt LARSIM-ME die Charakteristika der Schneeverteilung und -höhe in bundesweiter Sicht gut wieder (wie der Vergleich der LARSIM-ME-Simulation (Antrieb: beobachtete meteorologische Daten, HYRAS) für den Zeitraum 1971 bis 2000 mit einem aus Schneebeobachtungen interpolierten Rasterprodukt (DWD, 2018) zeigt).

Tabelle 35: Übersicht der Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Natürliche Schneesicherheit	Mittlere Anzahl der potenziellen Schneetage im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar ¹⁹	TOU-KL-01
Natürliche Schneesicherheit	Mittlere Anzahl der Niederschlagstage im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar, die keine potenziellen Schneetage sind – Berechnungsgrundlage: Mittlere Anzahl potenzieller Schneetage zwischen 10. Dezember und 31. Januar	TOU-KL-02

¹⁸ Autoren dieses Abschnitts sind Enno Nilson und Claudius Fleischer, Bundesanstalt für Gewässerkunde.

¹⁹ Die Festlegung des Zeitraums 10.12. bis 31.1. als Grundlage für die vorliegende Analyse wurde im Rahmen des Expertenworkshops zum Handlungsfeld Tourismus (im Juni 2019) getroffen. Dieser Zeitraum gilt als besonders relevant für den Skitourismus. Ein längerer Zeitraum (bis Mitte oder Ende März) wurde diskutiert, letztlich aber nicht als Referenzzeitraum für die indikatorbasierte Analyse ausgewählt.

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Natürliche Schneesicherheit	Mittlere Anzahl der Niederschlagstage zwischen 10. Dezember und 31. Januar	
Technische Schneesicherheit	Durchschnittliches Datum der ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage	TOU-KL-03
Winterlandschaft/ Winteratmosphäre	Mittlere Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe \geq drei Zentimeter und vieljährige mittlere Prozentanteile an Tagen mit Schneehöhen \geq drei Zentimeter im Wintertourismus-relevanten Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar	TOU-KL-04

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, "Konzept und Methodik").

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Die mittlere Anzahl potenzieller Schneetage im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar lag im Bezugszeitraum (1971 bis 2000) (Abbildung 8) in den meisten Teilen Deutschlands bei fünf bis zehn Tagen im Zeitraum Mitte Dezember bis Ende Januar. In weniger kontinental geprägten westlichen und zentralen Tieflandbereichen sowie im Oberrheingraben und am Mittelrhein lag diese Anzahl bei bis zu fünf Tagen. In den Mittelgebirgen und Alpen traten überwiegend im Mittel 10 bis 15 beziehungsweise bis 20 potenzielle Schneetage zwischen Mitte Dezember und Ende Januar auf und in den höchsten Lagen der deutschen Mittelgebirge (Harz, Bayerischer Wald) und den Alpen kamen durchschnittlich bis zu 25 und sehr begrenzt bis zu 29 potenzielle Schneetage in diesem Zeitraum vor.

Die Darstellung der mittleren Anzahl an Niederschlagstagen in der Periode 10. Dezember bis 31. Januar (Abbildung 9), die keine potenziellen Schneetage sind, in Kombination mit der Darstellung der mittleren Anzahl potenzieller Schneetage im selben Zeitraum (Abbildung 8) erlaubt Rückschlüsse auf das Verhältnis von Schnee- zu Regentagen im Wintertourismus-relevanten Zeitraum. In den höheren Mittelgebirgslagen und in den Alpen liegt die Anzahl an Niederschlagstagen (im besagten Zeitraum), die keine potenziellen Schneetage sind bei maximal sechs Tagen. Es kommen also im Mittel maximal sechs Regentage, das heißt, sechs jener Tage vor, die als besonders beeinträchtigend für den Wintertourismus einzustufen sind. Die Anzahl dieser Tage im besagten Zeitraum ist sowohl in niedrigeren Lagen als auch in den stärker maritim geprägten westlichen Regionen Deutschlands höher. In diesen Regionen ist gleichzeitig die Anzahl an Schneetagen (im besagten Zeitraum) geringer, das Verhältnis Schnee- zu Regentage geht also

weit auseinander, während in den Mittelgebirgslagen und in den deutschen Alpen vergleichsweise mehr Schneetage auf die Gesamtanzahl an Niederschlagstagen im Wintertourismus-kritischen Zeitraum entfallen.

In den höchsten Lagen der Mittelgebirge sowie in den Alpen lagen die ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage (Abbildung 10) bereits im November; in tieferen Lagen der Mittelgebirge sowie im Alpenvorland und auf der Schwäbischen und Fränkischen Alb fielen die ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage in die erste Dezemberhälfte; in den westlichen Mittelgebirgen und im östlichen Teil des Norddeutschen Tieflands fielen diese Tage in die zweite Dezemberhälfte; und im Rhein-Main-Gebiet und in Nord und Nordwestdeutschland traten sie erst im Januar auf.

Im Bezugszeitraum war eine Schneewahrscheinlichkeit beziehungsweise Wahrscheinlichkeit einer Winteratmosphäre (Abbildung 11 und Abbildung 12) in den östlichen und zentralen Mittelgebirgen (Harz, Thüringer Wald, Fichtelgebirge, Erzgebirge, Pfälzer Wald, Bayerischer Wald) und teils im Südschwarzwald an drei Vierteln des Zeitraums 10. Dezember bis 31. Januar bis zum gesamten Zeitraum vorhanden; insbesondere in den Alpen fast im gesamten Zeitraum (beziehungsweise an über 90 Prozent des Zeitraums); auf der Schwäbischen Alb in der Hälfte bis zu drei Vierteln des Zeitraums und im Alpenvorland in einem Viertel bis zur Hälfte des Zeitraums; im kontinental geprägten östlichen Tiefland herrschte an 1/10 bis maximal einem Viertel der des Zeitraums eine Winteratmosphäre mit der Schneehöhe von \geq drei Zentimeter, während sich dies im eher maritim geprägten westlichen Tiefland und am Ober- und Mittelrhein auf maximal 1/10 des Zeitraums beschränkte. Betrachtet man die Winteratmosphäre (in Tagen mit der genannten Schneehöhe) auf das ganze Jahr verteilt (also nicht nur im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar) lassen sich höhere absolute Werte an Tagen, die diese Schneehöhe aufweisen, feststellen. Es zeigen sich aber die gleichen räumlichen Muster wie innerhalb des zuvor beschriebenen Zeitraums.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Bis zum Zeitraum Mitte des Jahrhunderts nimmt die mittlere Anzahl der potenziellen Schneetage im Zeitraum Mitte Dezember bis Ende Januar flächendeckend (überall in Deutschland) sowohl im pessimistischen Fall (hier 15. Perzentil des RCP8.5) als auch im optimistischen Fall (hier 85. Perzentil des RCP8.5) ab (Abbildung 8). Im optimistischen Fall würde sich in weiten Teilen Deutschlands eine Abnahme von ein bis drei Tagen beziehungsweise drei bis sechs Tagen ergeben. Diese stärkere Abnahme beträfe die Mittelgebirge, Ostsee-nahe Gebiete und Nord- und Nordostbrandenburg. Im pessimistischen Fall würde die Änderung stärker ausfallen, das heißt, die mittlere Anzahl potenzieller Schneetage im Zeitabschnitt Mitte Dezember bis Ende Januar würde größtenteils um drei bis sechs Tage beziehungsweise in den zentralen und südöstlichen Mittelgebirgslagen um sechs bis neun Tage abnehmen. Im pessimistischen Fall gäbe es bereits zur Mitte des Jahrhunderts in der gesamten Nordhälfte und in der Mitte Deutschlands in dem genannten Zeitabschnitt im Mittel maximal fünf potenzielle Schneetage, während es im Bezugszeitraum noch überwiegend im Mittel fünf bis zehn Tage waren. Werte von 25 bis 29 Tagen im Mittel könnten nicht mehr erreicht werden und Werte von 20 bis 25 Tagen im Mittel und 15 bis 20 Tagen im Mittel lediglich in sehr begrenztem Ausmaß im pessimistischen Fall und im optimistischen Fall in den deutschen Alpen und den zentralen und östlichen Mittelgebirgen (Bayerischer Wald, Erzgebirge, Harz, Thüringer Wald, Pfälzer Wald) und im südlichen Schwarzwald.

Sowohl im optimistischen als auch im pessimistischen Fall wird zur Mitte des Jahrhunderts die mittlere Anzahl an Niederschlagstagen im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar, die *keine* potenziellen Schneetage sind, flächendeckend zunehmen (Abbildung 9); im optimistischen Fall ist von dieser Zunahme insgesamt eine geringere Fläche betroffen als im pessimistischen Fall. Überall in Deutschland, auch in den „klassischen“ Wintersportgebieten (Mittelgebirge und Alpen), ist

bereits für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts mit einem geringeren Anteil an Schneetagen im Verhältnis zur Gesamtanzahl an Niederschlagstagen beziehungsweise gegenüber den Regentagen zwischen dem 10. Dezember und 31. Januar zu rechnen. Diese Zunahme an Regentagen im besagten Zeitraum kann sich einschränkend auf den Wintertourismus auswirken – zumindest unter Anwendung der bisher geltenden Annahmen zu wintertouristischen Reiseentscheidungen (Zeitraum, Destination).

Für das durchschnittliche Datum der ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil (das heißt, zwischen dem optimistischen und dem pessimistischen Fall) (Abbildung 10). Im günstigeren Fall (15. Perzentil des RCP8.5) fallen die ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage in den südlichen, zentralen und östlichen Mittelgebirgen, auf der Schwäbischen und Fränkischen Alb und in den Alpen in den Dezember; im östlichen und zentralen Norddeutschen Tiefland, im südlichen Oberrheingebiet und in Rheinland-Pfalz fallen diese Tage zumindest noch in die erste Januarhälfte; während sie im Rhein-Main-Gebiet, in Nordwest- und äußeren Westdeutschland in die zweite Januarhälfte fallen. Im ungünstigeren Fall (85. Perzentil des RCP8.5) treten die ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage erst in der zweiten Januarhälfte und im maritimer geprägten Nordwesten erst im Februar auf. Lediglich in den höheren Lagen der östlichen Mittelgebirge (Erzgebirge, Fichtelgebirge, Thüringer Wald, Bayerischer Wald) und des Harz sowie in kleinen Teilen des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb und in den Alpen fallen diese Tage noch in die erste Januarhälfte; und nur in sehr begrenzten Gebieten (kleine Teile der Alpen, Thüringer Wald, Fichtelgebirge) treten sie noch in der zweiten Dezemberhälfte auf. Damit reduzieren sich im ungünstigeren Fall die Gebiete, in denen die ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage in den aus wintertouristischer Sicht dafür entscheidenden Zeitraum Mitte bis Ende Dezember fallen, bereits zur Mitte des Jahrhunderts erheblich. Da diese auf das Vorhandensein winterlicher Witterungsbedingungen und auf die technische Schneesicherheit von Wintertourismusdestinationen hinweisen, können mit der angezeigten Veränderung im ungünstigeren Fall deutliche Einschränkungen im Wintertourismus, insbesondere im Wintersporttourismus, einhergehen. Im günstigeren Fall bliebe die Wintertourismus-Tauglichkeit (zumindest hinsichtlich der Temperatur) auch im besagten entscheidenden Zeitraum erhalten, die Veränderungen wären im günstigeren Fall also nicht als kritisch für den Wintertourismus einzustufen.

Zur Mitte des Jahrhunderts ist im pessimistischen Fall (hier das 15. Perzentil des RCP8.5) im überwiegenden Teil des Bundesgebiets mit dem Vorhandensein einer Winteratmosphäre beziehungsweise mit einer Schneewahrscheinlichkeit (bemessen an einer Schneehöhe von mind. drei Zentimeter) in 1/10 des Zeitraums Mitte Dezember bis Ende Januar zu rechnen (Abbildung 11 und Abbildung 12). In den Mittelgebirgen, im Alpenvorland und in den Alpen wären höhere Anteile an Tagen mit Winteratmosphäre in dem genannten Zeitraum zu verzeichnen, wobei die Anteile auch dort gegenüber dem Bezugszeitraum deutlich zurückgehen würden. Im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) wäre auch ein Rückgang der prozentualen Anteile von Tagen mit Winteratmosphäre im Zeitraum Mitte Dezember bis Ende Januar zu verzeichnen, dieser würde allerdings weniger stark ausfallen, sodass die Gebiete mit Anteilen über einem Viertel an Tagen mit Winteratmosphäre am Zeitraum Mitte Dezember bis Ende Januar großflächiger wären, das heißt, bis in tiefere Lagen hineinreichen würden. Auf das ganze Jahr verteilt, kommen in absoluten Werten mehr Tage mit Winteratmosphäre (gemessen in einer Schneehöhe von \geq drei Zentimeter) vor, für das räumliche Verteilungsmuster ergeben sich aber keine Unterschiede gegenüber dem eingegrenzten Wintertourismus-relevanten Zeitraum. Dieser Vergleich der beiden Darstellungen zeigt, dass die Anzahl der Tage mit besagter Schneehöhe bis zur Mitte des Jahrhunderts insgesamt, also aufs gesamte Jahr bezogen und nicht nur innerhalb des – nach aktuellem Kenntnisstand zur Nachfrageseite des Wintertourismus – entscheidenden Zeitraum Mitte

Dezember bis Ende Januar abnehmen wird. So werden sich die Gebiete mit einem Gesamtzeitraum von über zwölf Wochen, über acht Wochen und zwischen vier und acht Wochen mit einer Schneedecke von \geq drei Zentimeter im pessimistischen Fall im Vergleich zum Bezugszeitraum erheblich verkleinern; auch im optimistischen Fall werden solche Längen von Zeiträumen mit Winteratmosphäre weniger verbreitet sein; dies betrifft auch alle Mittelgebirge, die Alpen und das Alpenvorland – und damit die „klassischen“ Wintertourismusdestinationen – relativ stark, das heißt, dort werden sich die Flächen, in denen eine Schneedecke von \geq drei Zentimeter in Zeiträumen von mehr als zwölf beziehungsweise zwischen acht und zwölf Wochen auftritt deutlich verringern und in größeren Teilen wird sich der Zeitraum auf vier bis acht Wochen verlagern. Während im optimistischen Fall (85. Perzentil) der Anteil der Gebiete Deutschlands, in denen Schneehöhen von \geq drei Zentimeter in einem Gesamtzeitraum von einer bis zwei Wochen auftritt am weitesten verbreitet sein wird, hat im pessimistischen Fall (15. Perzentil) der Gesamtzeitraum bis maximal eine Woche den größten flächenmäßigen Anteil. Da sich insgesamt nicht nur die Schneewahrscheinlichkeit im kritischen Zeitraum Mitte Dezember bis Ende Januar verringert, sondern die Gesamtzeiträume des Vorhandenseins einer Winteratmosphäre verkürzen, ließen sich die möglichen Einschränkungen des Wintertourismus durch den Rückgang der Anzahl an Tagen mit Winteratmosphäre nicht notwendigerweise durch eine Verlagerung des Zeitraums für wintertouristische Aktivitäten (innerhalb Deutschlands) ausgleichen.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

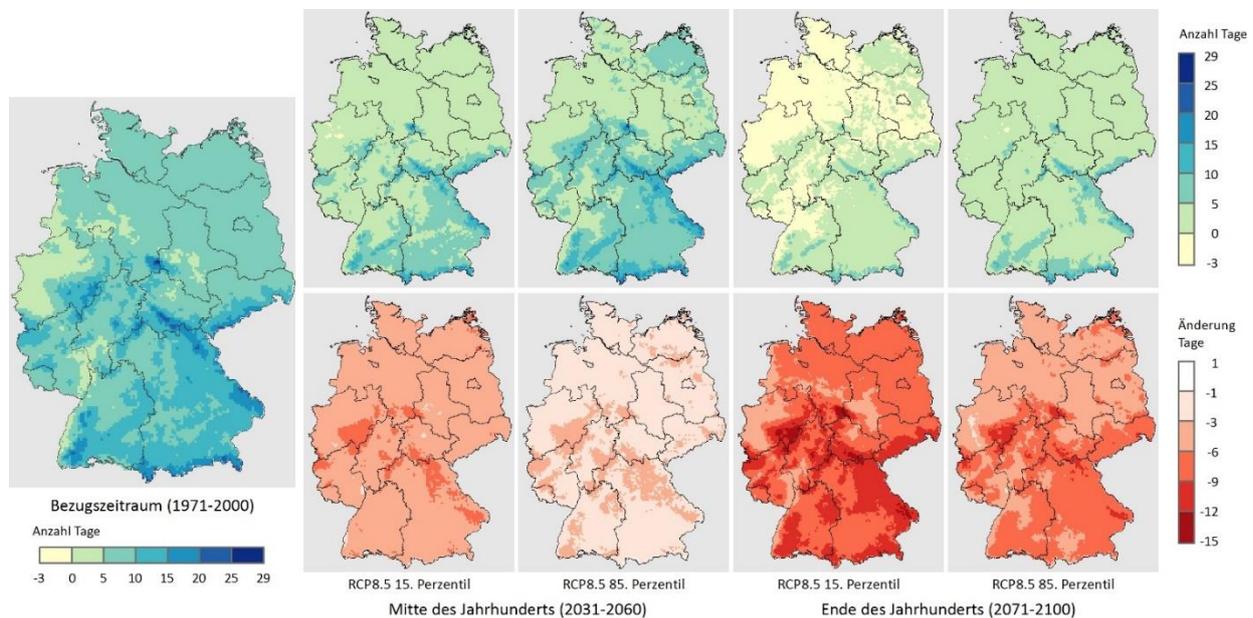
Für das Ende des Jahrhunderts wird für die mittlere Anzahl potenzieller Schneetage im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar eine Fortsetzung des oben beschriebenen Trends projiziert (Abbildung 8). Im pessimistischen Fall nimmt die mittlere Anzahl der potenziellen Schneetage im Zeitraum Mitte Dezember bis Ende Januar in den Mittelgebirgen und in den Alpen um neun bis zwölf Tage beziehungsweise um 12 bis 15 Tage ab und in fast allen restlichen Teilen Deutschlands um sechs bis neun Tage. Auch im optimistischen Fall wird von einem Rückgang der potenziellen Schneetage zwischen Mitte Dezember und Ende Januar im Vergleich zum Bezugszeitraum ausgegangen, aus dem sich letztlich nahezu flächendeckend eine mittlere Anzahl potenzieller Schneetage von maximal fünf im optimistischen Fall und null (in weiten Teilen, außer Süd- und Südostdeutschland) im pessimistischen Fall resultiert. Ausnahmen bilden die Alpen, der Südschwarzwald, die Schwäbische Alb sowie begrenzte Teil der zentralen und östlichen Mittelgebirge, in denen zumindest im günstigeren Fall im Mittel noch fünf bis zehn potenzielle Schneetage zwischen Mitte Dezember und Ende Januar vorkommen würden.

Für das Ende des Jahrhunderts fallen die Änderungen der mittleren Anzahl an Niederschlagstagen in der Periode 10. Dezember bis 31. Januar, die keine potenziellen Schneetage sind sowohl für den optimistischen Fall als auch für den pessimistischen Fall deutlich stärker aus als für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts (Abbildung 9). Im maritimer geprägten Westen Deutschlands ist teils mit 24 bis 30 Tagen im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar zu rechnen, die zwar Niederschlagstage aber keine potenziellen Schneetage sind. Bei der gleichzeitig abnehmenden mittleren Anzahl potenzieller Schneetage wird das Verhältnis von potenziellen Schneetagen zu Regentagen in dem Zeitraum dort also am stärksten auseinandergehen. Aber auch in den deutschen Alpen, im Alpenvorland, auf der Schwäbischen und Fränkischen Alb und in den Mittelgebirgen wird die Anzahl an Niederschlagstagen, die keine potenziellen Schneetage sind, im Wintertourismus-relevanten Zeitraum zunehmen und gleichzeitig mit einer deutlichen Abnahme der mittleren Anzahl potenzieller Schneetage in besagtem Zeitraum zu rechnen sein (Abbildung 8). Ausgehend von der aktuellen Wintertourismus-Nachfrage könnten mit diesen Veränderungen in den „klassischen“ Wintersportgebieten spürbare Einschränkungen einhergehen.

Im optimistischen Fall fallen die ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage (Abbildung 10) am Ende des Jahrhunderts in relativ begrenzten Teilen Deutschlands, nämlich teilweise Schwarzwald, Schwäbische Alb, Oberpfälzer Wald, kleinere Teile des Erzgebirges sowie die Alpen und das südliche Alpenvorland, in die zweite Dezemberhälfte. Im restlichen Bundesgebiet treten diese Tage erst im Januar auf, im Westen und Nordwesten und im zentralen Teil der Norddeutschen Tiefebene sogar erst in der zweiten Januarhälfte. Im pessimistischen Fall treten die ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage in Süd- und Ostdeutschland und kleineren Teilen Norddeutschlands erst in der zweiten Januarhälfte auf beziehungsweise im zentralen Norddeutschen Tiefland, an den Küsten und in Nordwest- und Westdeutschland erst im Februar. Dementsprechend bliebe zum Ende des Jahrhunderts die technische Schneesicherheit nur im optimistischen Fall erhalten; wenngleich auf einer insgesamt deutlich kleineren Fläche als im Bezugszeitraum.

Für das Ende des Jahrhunderts ist vom Voranschreiten des Trends, der sich bereits zur Mitte des Jahrhunderts für die Winteratmosphäre beziehungsweise die Schneewahrscheinlichkeit abzeichnet, auszugehen (Abbildung 11 und Abbildung 12). Im pessimistischen Fall tritt eine Winteratmosphäre nahezu flächendeckend in maximal 1/10 des Zeitraums Mitte Dezember bis Ende Januar auf; lediglich in den Alpen noch in über einem Viertel des Zeitraums beziehungsweise in sehr begrenzten Teilen der deutschen Alpen auch an bis zu drei Vierteln des Zeitraums. Im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) fiele der Rückgang weniger drastisch aus; die Anteile der Tage mit Winteratmosphäre im Zeitraum Mitte Dezember bis Ende Januar würden sich aber auch in diesem Fall auf weitgehend 1/10 beschränken, in höheren Lagen (Mittelgebirge und Alpen) wäre noch mit höheren Anteilen an Tagen mit Winteratmosphäre zu rechnen (bis zu ein Viertel beziehungsweise bis zu drei Viertel).

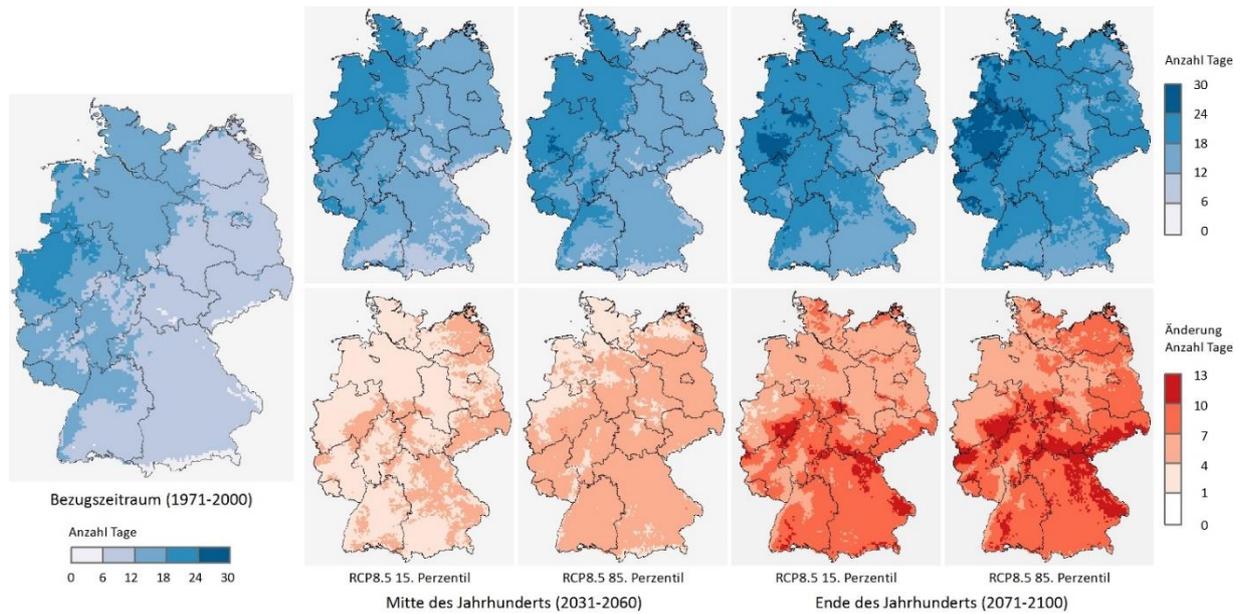
Abbildung 8: Mittlere Anzahl potenzieller Schneetage im Zeitraum 10. Dezember bis 31. Januar



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

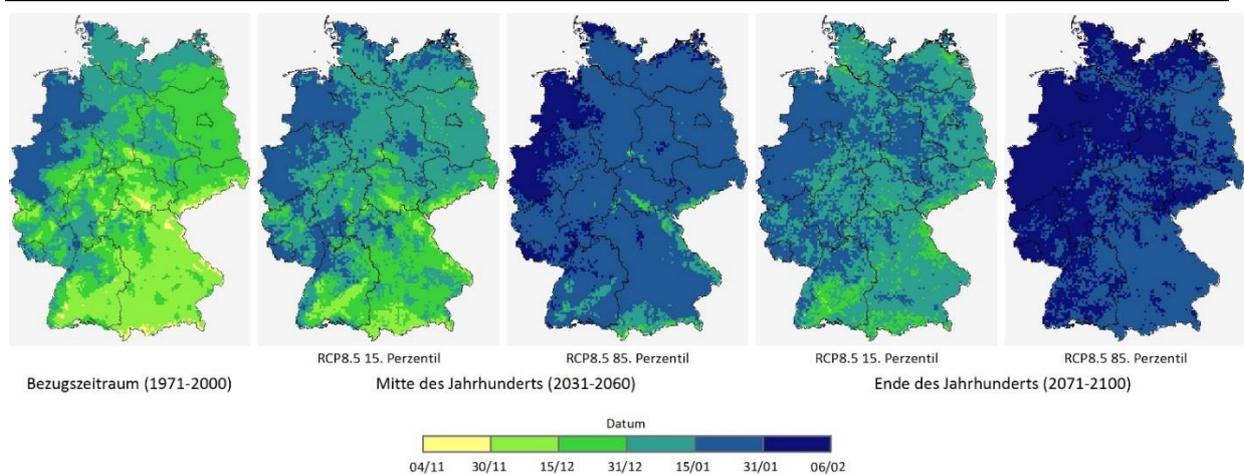
Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich hier und in den folgenden Abbildungen jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Abbildung 9: Mittlere Anzahl an Niederschlagstagen in der Periode 10. Dezember bis 31. Januar, die keine potenziellen Schneetage sind



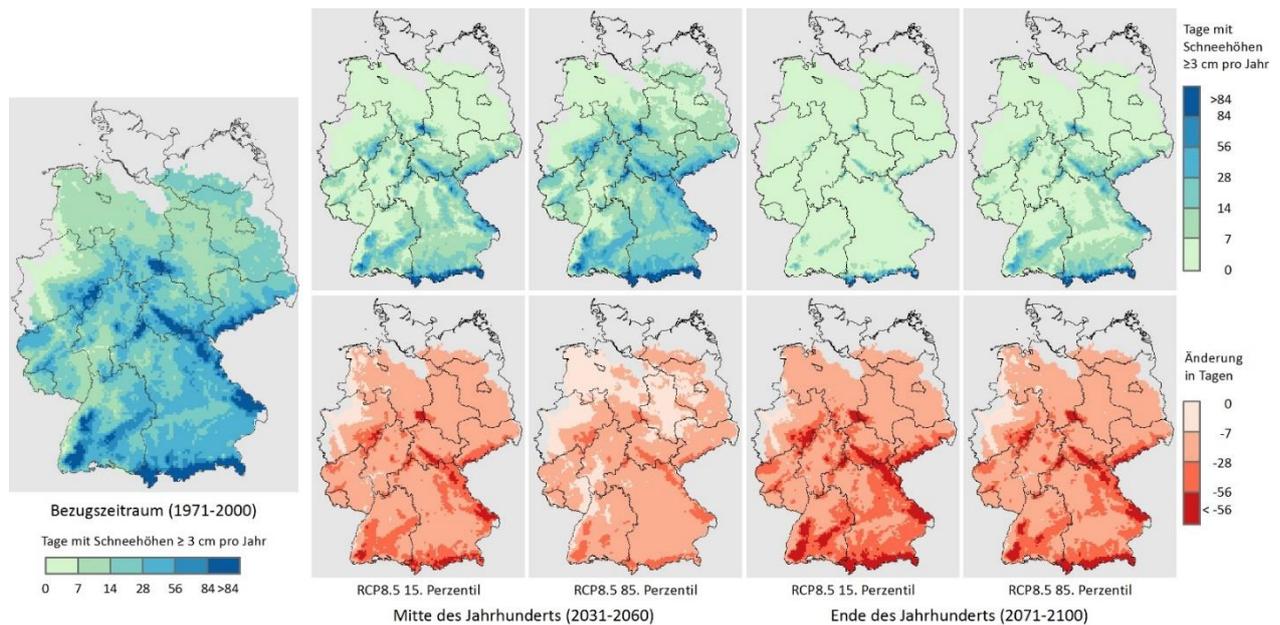
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 10: Datum des ersten Tages im Winter, der als Eistag auf zwei vorhergehende Eistage folgt (Maximaltemperatur $t_{\text{max}} < 0^\circ\text{C}$)



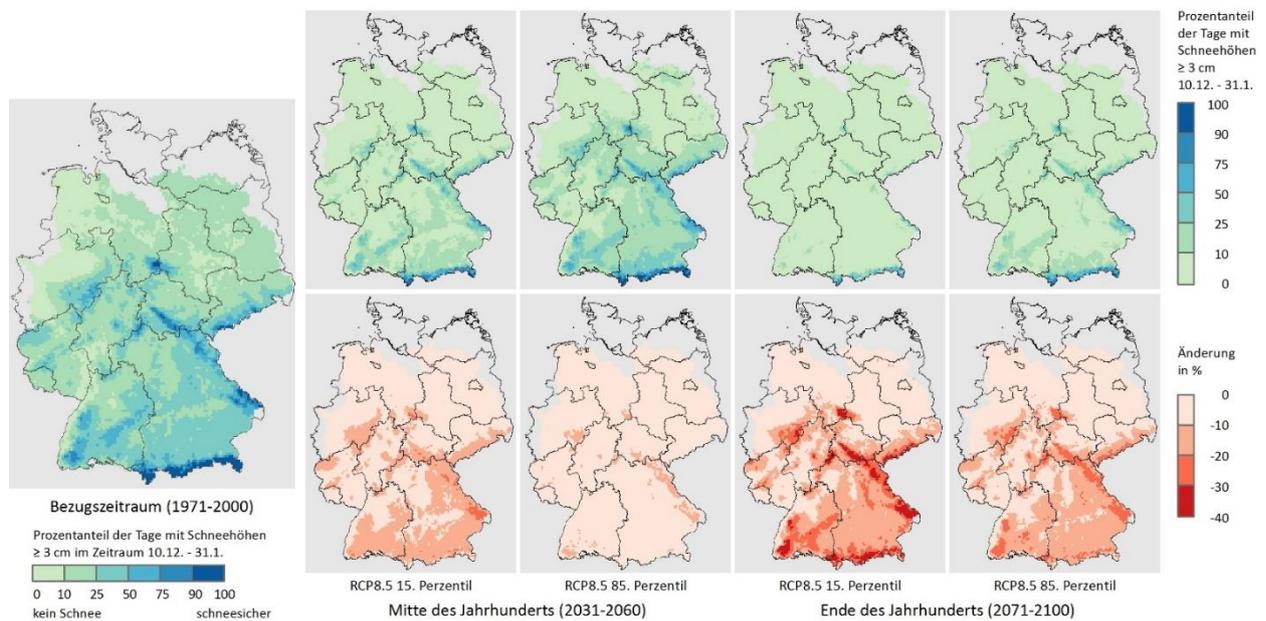
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 11: Winteratmosphäre – Mittlere Anzahl an Tagen pro Jahr mit einer Schneehöhe \geq drei Zentimeter



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Abbildung 12: Schneewahrscheinlichkeit – vieljährige mittlere Prozentanteile an Tagen mit Schneehöhen \geq drei Zentimeter im Zeitraum zwischen 10. Dezember und 31. Januar



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Zusammenfassung und Unsicherheiten in den Ergebnissen

Zwar ist mit stärkeren Änderungen erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu rechnen; teils treten aber bereits bis zur Mitte des Jahrhunderts deutliche Veränderungen auf (zum Beispiel hinsichtlich der Winteratmosphäre, der Schneewahrscheinlichkeit und des Eistage-Auftretens), womit auch Veränderungen im Tourismussektor einhergehen werden.

Führt man die verwendeten Indikatoren für den Faktor Schneesicherheit zu einer Matrix zusammen, in welcher zwischen einem für den Wintertourismus kritischen und unkritischen Zustand

unterschieden wird, lässt sich daraus zumindest anhand des Faktors Schneesicherheit eine Einschätzung der Klimawirkung ableiten (Tabelle 36). Eine weitere Differenzierung des Wertebereichs (kritisch – unkritisch) erfolgt durch die Werte „überwiegend kritisch“ und „nicht flächendeckend unkritisch“. Den unterschiedlichen Kombinationen der Werte je Faktor und je Fall ist je ein Wert der Einschätzung der Klimawirkung zugeordnet (Erläuterung zu Tabelle 36). Die Klimawirkung wäre dementsprechend für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts als mittel und für den Zeitraum Ende des Jahrhunderts als stark einzustufen.

Tabelle 36: Zusammenführung der Indikatoren für den Faktor Schneesicherheit

Faktor	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts	
	Optimistischer Fall	Pessimistischer Fall	Optimistischer Fall	Pessimistischer Fall
Anteil potenzieller Schneetage	Nicht flächendeckend unkritisch	Überwiegend kritisch	Kritisch	Kritisch
Eistage	Unkritisch	Kritisch	Nicht flächendeckend unkritisch	Kritisch
Einschätzung der Klimawirkung anhand des Faktors Schneesicherheit	(Gering-) Mittel	Mittel	Mittel-Stark	Stark

Erläuterung zu Tabelle 36: Wertebereich der Faktor-Kombinationen und Zuordnung der Kategorien der Klimawirkung zu diesen Werten

	Unkritisch	Nicht flächendeckend unkritisch	Überwiegend kritisch	Kritisch
Unkritisch	Gering	(Gering-) Mittel	(Gering-) Mittel	Mittel
Nicht flächendeckend unkritisch	(Gering-) Mittel	(Gering-) Mittel	Mittel	Mittel-Stark
Überwiegend kritisch	(Gering-) Mittel	Mittel	Mittel-Stark	Mittel-Stark
Kritisch	Mittel	Mittel-Stark	Mittel-Stark	Stark

Aussagen zu zukünftigen Einschränkungen im Wintertourismus mithilfe der verwendeten Indikatoren (Verhältnis der potenziellen Schneetage zu Regentagen in der Periode Mitte Dezember bis Ende Januar, Abbildung 8 und Abbildung 9, und durchschnittliches Datum der ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage, Abbildung 10) sind allerdings mit Unsicherheiten verbunden. Erstens existieren datenspezifische Fehlerquellen, zum Beispiel, wenn die teilweise speziellen Lagen von Messstationen die Verlässlichkeit der Aussagen zu Schneebedingungen einschränken, diese Daten aber gleichzeitig mit in die Erstellung der Klimaprojektionen einfließen. Außerdem ist es umso schwieriger valide und genaue Aussagen zu treffen, je geringer die Anzahl an Schneetagen ist. Weiterhin besteht ein großer Unterschied zwischen Schneetagen im Zeitraum zwischen 21. Dezember und 6. Januar, an denen mehr Menschen aufgrund von Ferien auch die Möglichkeit zum Reisen haben, im Vergleich zu Schneetagen Ende Januar. Eine andere Unsicherheit ergibt sich aus der Berechnung der Schneetage, die eine Multiplikation aus verschiedenen Parametern beinhaltet, die jeweils eine eigene Unsicherheit in sich bergen. Außerdem wird der Indikator nicht direkt Bias-korrigiert, sondern wird aus Bias-korrigierten Daten abgeleitet.

Neben diesen aus der Datengrundlage resultierenden Unsicherheiten, spielen Akteurs-bezogene Unsicherheiten eine wichtige Rolle. So kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden,

dass genau jene Reisegebiete, die als geeignet für den Wintertourismus eingestuft werden (insbesondere Alpen, Alpenvorland und bestimmte Mittelgebirge) von geringerer Schneesicherheit tatsächlich beeinträchtigt werden. Auch bei diesen Überlegungen ist wieder zwischen Wirkungen des Klimawandels auf der Angebots- und auf der Nachfrageseite zu unterscheiden. Gäste, deren primäres Reisemotiv an Schneesicherheit gekoppelt ist, reagieren sehr sensibel auf deutliche Einschränkungen oder gar den Wegfall dieser Aktivitätsoption und suchen sich für die Zukunft neue Reiseziele. Bei dieser Gruppe von Gästen hängt die Destinationswahl stark vom zentralen Reisemotiv, beispielsweise wintersportliche Aktivität, und von der Durchführbarkeit dessen am gewählten Urlaubsort ab. Daher ist für Tourismusdestinationen in Deutschland letztlich sehr zentral, wie hoch in der jeweiligen Destination der Anteil an Gästen ist, die zur Gruppe derjenigen zählen, die Schnee zur unabdingbaren Voraussetzung der Erfüllung ihrer Urlaubserwartungen benötigen. Ist dieser Anteil eher gering, ist die Vulnerabilität auf Destinationsebene deutlich niedriger zu bewerten. Auf der einzelbetrieblichen Ebene (zum Beispiel Bergbahn) kann dies wiederum anders aussehen. Diese unterschiedlichen Akteursebenen sind bei der Einschätzung der Klimawirkung zu berücksichtigen.

Vor dem Hintergrund der Nachfrageseite ergeben sich für die Gesamteinschätzung der Klimawirkung Unsicherheiten aus der Multikausalität von Reiseentscheidungen. Wie bereits angedeutet, geht aufgrund der möglichen multioptionalen Ausgestaltung touristischer Aufenthalte durch Reisende der Wegfall eines touristischen Angebots (zum Beispiel Skisport) nicht zwangsläufig mit dem Ausscheiden eines Ortes als Destination für den Wintertourismus einher (stattdessen kann derselbe Ort für die Ausübung anderer Aktivitäten besucht werden, zum Beispiel Mountainbiking, Wandern, Wellness) (Bausch et al. 2016; Wölfle et al. 2018). Des Weiteren sind für die Reiseentscheidung nicht nur die Schneesicherheit beziehungsweise das Schneeaufkommen an den Destinationsorten ausschlaggebend, sondern auch die Winteratmosphäre am Herkunfts-ort der Reisenden. Weiterhin lassen sich Reiseentscheidungen nicht ausschließlich auf Witterungsbedingungen und klimatische Gegebenheiten zurückführen. Und es spiegelt sich in Reiseentscheidungen auch eine vergleichsweise hohe Anpassbarkeit an sich ändernde Gegebenheiten wider (unter anderem auch klimatische Veränderungen) (Scott et al. 2009; Bischof et al. 2017; Wölfle et al. 2018). Insgesamt kann die Sicherheit von physischen Aussagen als mittelhoch und die Sicherheit anderer Aussagen, unter anderem aufgrund der Multioptionalität von Reiseentscheidungen, als gering eingestuft werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 37: „Auswirkungen von fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Auswirkungen von fehlender Schneesicherheit auf den Wintertourismus“

- ▶ Angesichts des Rückgangs von Schnee- gegenüber Regentagen zwischen Mitte Dezember und Ende Januar und der Verlagerung des Datums der ersten drei aufeinanderfolgenden Eistage ist mit der Herabsetzung der Schneesicherheit im (aktuell) Wintertourismus-relevanten Zeitraum zu rechnen.
- ▶ Sowohl Zeiträume mit Winteratmosphäre als auch die natürliche Schneewahrscheinlichkeit im (aktuell) Wintertourismus-kritischen Zeitraum gehen flächendeckend deutlich zurück. Das würde sich besonders ungünstig in den bisher „klassischen“ Wintertourismusdestinationen (Mittelgebirge, Alpen, Alpenvorland) auswirken beziehungsweise wäre dort eine entsprechende Anpassung erforderlich.
- ▶ Die Gebiete, in denen die Schneewahrscheinlichkeit gleich (hoch) bleibt, sind bereits zur Mitte des Jahrhunderts sehr begrenzt (vor allem auf die deutschen Alpen).

3.2.1.2 Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Eigenschaften des Wetters und Klimas, die direkt auf die Gesundheit oder das Wohlbefinden eines Menschen wirken, werden in ihrer Gesamtheit üblicherweise als Bioklima bezeichnet (DWD o.J.). Ein positives Bioklima, insbesondere Temperaturparameter, sind aus touristischer Sicht unter anderem für den Gesundheitstourismus von Bedeutung (Berg 2008). Das Bioklima einer Region lässt sich anhand der thermoregulatorischen Anforderungen an den menschlichen Organismus bestimmen, welche sich als Tage mit Wärmebelastung und Tage mit Kältereiz operationalisieren lassen (Graw et al. 2019). Inwieweit und in welcher Intensität sich meteorologische Parameter auf die Gesundheit auswirken, hängt auch von der individuellen Wetterfähigkeit ab (Höppe et al. 2002). Zur Verknüpfung des Wetters beziehungsweise Klimas mit dem menschlichen thermischen Empfinden wird über ein Energiebilanz- beziehungsweise Wärmehaushaltsmodell des Menschen (Klima-Michel-Modell) die Gefühlte Temperatur berechnet. Dabei werden Aktivität und Bekleidung sowie weitere physiologische Parameter als Faktoren berücksichtigt, die sich neben den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung ebenfalls auf das thermische Empfinden eines Menschen auswirken (Staiger et al. 2012). Außerdem werden Akklimatisation und Schwüle zur Beschreibung des Bioklimas herangezogen (Koppe und Jendritzky 2005; Staiger et al. 2012; Staiger et al. 2018).

Unter Gesundheitstourismus sind jene Ortswechsel zu verstehen, die unter Inanspruchnahme von Gesundheitsdienstleistungen sowie Präventions- und Wellness-Angeboten oder mithilfe der natürlichen Vorzüge des Aufenthaltsortes für gesundheitsfördernde Aktivitäten zur Förderung und Wiederherstellung des körperlichen, mentalen oder sozialen Wohlbefindens getätigt werden (Sonnenschein 2009; Cassens 2013; Zirkel 2013; DTV und DHV 2017; Quack und Wölflé

2018). Unter Gesundheitstourismus fallen dementsprechend die Inanspruchnahme von Wellness- und Fitnessangeboten wie Rehabilitations- und Gesundheitspräventionsmaßnahmen und Kuren. Das Potenzial, gesundheitstouristischen Bedarfen gerecht zu werden, ist an bestimmten Destinationen besonders hoch. Beispielsweise dienen die 350 prädikatisierten Orte in Deutschland unter anderem auf Grund ihrer „Tradition, Lagegunst (geographisch, landschaftlich, klimatisch), ortsgebundener Heilmittel, ortstypischer Heilverfahren, gesundheitstouristischer Infrastruktur, des qualifizierten Anbieterbesatzes und ihrer qualitativ hochwertigen Angebote“ der Prävention und Gesundheitsförderung (BMW 2011). Gleichwohl geht damit nicht zwangsläufig einher, dass diese Orte ausschließlich zur Inanspruchnahme gesundheitstouristischer Angebote aufgesucht werden. Kurtourismus in Deutschland findet insbesondere in den besagten prädikatisierten Heilbädern und Kurorten und in deren Umgebung statt. Festzustellen ist allerdings, dass sich die Urlaubsmotive und Aktivitäten der Übernachtungsgäste an diesen Orten nicht auf das Kuren beschränken. Dementsprechend belaufen sich die auf kurtouristische Motive zurückzuführenden Gästeübernachtungen in diesen prädikatisierten Orten auf einen geringen Anteil an den insgesamt an diesen Orten zu verzeichnenden Gästeübernachtungen. Dies trifft insbesondere auf Luftkurorte, heilklimatische Kurorte und Seebäder zu (DHV 2018). Für die Tourismuswirtschaft in Deutschland sind die touristischen Aktivitäten in diesen Orten von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Übernachtungen in heilklimatischen Kurorten, Heilbädern, Seebädern und Luftkurorten machen etwa ein Drittel der touristischen Übernachtungen in Deutschland aus. Werden Mineral- und Moorbäder sowie Kneippkurorte hinzugezählt, entfällt knapp die Hälfte aller Übernachtungen auf diese Gemeindegruppen (Destatis 2019).²⁰

Für die Erlangung bestimmter Kurortprädikate werden in Deutschland bioklimatische Richtwerte herangezogen (DTV und DHV 2011). Für die Erlangung eines Prädikats des Deutschen Heilbäderverbands als Heilklimatischer Kurort oder Seeheilbad beispielsweise darf eine Wärmebelastung höchstens an 20 Tagen pro Jahr (im vieljährigen Durchschnitt) auftreten, das heißt, um aus bioklimatischer Sicht Kurortprädikat-fähig zu sein, darf eine Wärmebelastung am jeweiligen Ort an nicht mehr als 20 Tagen pro Jahr auftreten.²¹ Dabei sind kleinräumige Unterschiede durch die jeweilige Landnutzung, welche sich unter anderem begünstigend beziehungsweise Wärme-kompensierend auswirken kann, zu berücksichtigen. Unter Wärmebelastung ist die Abweichung von einer ausgeglichenen Wärmebilanz (von 60 W/m² bei Sommerbekleidung) laut dem Klima-Michel-Modell (siehe oben) zu verstehen (DTV und DHV 2017). Legt man das weiterentwickelte Verfahren zur Bestimmung des Bioklimas zugrunde, lägen die ortsspezifischen Richtwerte für die maximale Anzahl an Tagen pro Jahr mit Wärmebelastung zwischen 11 und 15 Tagen (Graw et al. 2019). Der ortsspezifische Richtwert wurde als Entsprechung zu den zuvor genannten 20 Tagen pro Jahr eingeführt, da das weiterentwickelte Verfahren die Verteilung der Ereignistage nicht linear verändert. Tritt eine Wärmebelastung häufiger auf, ergäbe sich daraus eine bioklimatische Beurteilung eines Ortes, die einer Prädikatvergabe (zur Ausweisung eines Ortes als Kurort) widerspräche. Die aus besagtem weiterentwickelten Berechnungsverfahren resultierende geringere Anzahl an Tagen mit Wärmebelastung, weist nicht auf eine Verringerung der Wärmebelastung hin, vielmehr wurde mithilfe einer Nachanalyse eine Zunahme von etwa 1,5 Wärmebelastungstagen im Flächenmittel über Deutschland und von bis zu fünf Wärmebelastungstagen entlang des Oberrheins festgestellt. Das dennoch weniger häufige Auftreten von

²⁰ Hierzu zählen allerdings nicht nur die Übernachtungen von Kurgästen, sondern auch die Übernachtungen anderer Gäste in diesen Orten. Wie groß der Anteil der Touristen ist, die ihren Aufenthalt in einem Heilbad oder Kurort aufgrund der Prädikatisierung beziehungsweise des spezifischen gesundheitstouristischen Angebots vornehmen, lässt sich auf Grundlage bestehender Statistiken und Auswertungen nicht quantifizieren.

²¹ Der Richtwert für einen Tag mit Wärmebelastung liegt bei 29 Grad Celsius gefühlter Temperatur. Außerdem gilt ein Toleranzbereich von drei zusätzlichen Tagen mit Wärmebelastung, wenn diese durch abendliche Abkühlung kompensiert werden kann.

Tagen mit Wärmebelastung beim weiterentwickelten Verfahren im Vergleich zu dem für die Prädikatisierung verwendeten Verfahren, ergibt sich aus der Anhebung des Schwellenwertes um etwa drei Grad Celsius, ab dem ein Tag als ein Tag mit Wärmebelastung definiert wird und der Berücksichtigung neuer Erkenntnisse über die Anpassung des menschlichen Organismus an Temperatur- und Schwüleverhältnisse. Eine direkte Vergleichbarkeit beider Verfahren geht durch die Weiterentwicklungen verloren, ist aber durch eine Nachanalyse möglich (ebd.).

Das Vorkommen der bioklimatisch entscheidenden Parameter Wärmebelastung und Kältereiz in Abhängigkeit von meteorologischen Einflussgrößen und dem thermischen Empfinden lässt sich für Deutschland als Bezugsraum wie folgt differenzieren: Sommerliche Wärmebelastung tritt häufig im gesamten Rheintal sowie entlang der Flusstäler von Neckar, Main und Mosel auf; in Südbayern und großen Teilen Sachsens kommen sowohl Wärmebelastung als auch Kältereiz häufig vor; letzteres gilt auch für Nordostdeutschland, wohingegen Wärmebelastung dort eine geringere Rolle spielt; für Nordwestdeutschland ist ein nur gelegentliches Auftreten sowohl von Wärmebelastung als auch Kältereiz zu beobachten; ein ähnlich ausgeglichenes Verhältnis ist auch für viele Hanglagen der Mittelgebirge typisch; in höheren Lagen überwiegt hingegen der Kältereiz, während Wärmebelastung hier selten auftritt; in den Küstengebieten kommen sowohl Wärmebelastung als auch Kältereiz vergleichsweise selten vor (Graw et al. 2019). Ein besonders starker Zusammenhang zwischen medizinischer Indikation, Therapieform (beziehungsweise Präventions- oder Rehabilitationsmaßnahme) und örtlichen klimatischen Gegebenheiten besteht bei der Klimatherapie, bei der klimatische Reize gezielt für medizinische Zwecke eingesetzt werden (DTV und DHV 2017). Eine Verschlechterung des Bioklimas kann zu einem Wegfall dieses spezifischen Angebots führen.

Die spezifischen Richtwerte für die Wärmebelastung beziehen sich ausschließlich auf Kurorte. Der Gesundheitstourismus beschränkt sich jedoch nicht auf den Kurbäderbetrieb oder die Klimatherapie. Sofern es sich um Destinationen handelt, die keine Kurorte sind, existieren keine spezifischen Richtwerte für die Wärmebelastung.

Weitere den Gesundheitstourismus betreffende klimatische Einflüsse – neben Hitze und Kältereizen – hängen zum Beispiel mit der Wasserqualität an Meeresstränden und Binnengewässern zusammen. Diese muss gemäß den Standards im Gesundheitstourismus bestimmten Hygieneanforderungen genügen (DTV und DHV 2017), was Klimawandel-bedingt allerdings stellenweise schwieriger wird. Die biologische und chemische Wasserqualität wird in den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“ genauer betrachtet, außerdem wird der Zusammenhang zur Gesundheit unter der Klimawirkung „Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“ (siehe 4.2.3) beleuchtet. Ferner können bioklimatische Faktoren wie UV-Belastung oder Lufthygiene durch den Klimawandel beeinflusst werden, beispielsweise durch die Veränderung von Strahlungsintensitäten und Pollenflugzeiten (UBA 2019). Nicht nur aus heilklimatischer Sicht hat das Allergenaufkommen in der Luft eine Bedeutung für den Gesundheitstourismus. Orte mit „Heilklima“ sollten weitgehend allergenfrei sein (DTV und DHV 2017). Eine solche Allergenarmut wäre auch für gesundheitstouristische beziehungsweise auf Allergielinderung abzielende Aufenthalte zum Beispiel in Luftkurorten oder Seebädern wünschenswert. Die Ausbreitung von Allergenen, wie diverse Heuschnupfen- und/oder Asthma-auslösende oder -verschlimmernde Pollenarten beziehungsweise deren Flugzeiten und Konzentration, welche durch eine längere Vegetationsperiode begünstigt werden (UBA 2019), könnte sich auf den Gesundheitstourismus demzufolge angebotseinschränkend auswirken. Auf Änderungen der Pollenflugzeiten aufgrund des Klimawandels wird im Kapitel „Allergische Reaktionen durch Aeroallergenen pflanzlicher Herkunft (zum Beispiel Pollen)“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ genauer eingegangen (siehe 4.2.2).

Entwicklung bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts

Aus der für die Zukunft anzunehmenden steigenden Häufigkeit und Intensität von Wärmeperioden sowie der Zunahme der mittleren Lufttemperaturen lassen sich für die Mitte des Jahrhunderts beeinträchtigende Wirkungen für den Gesundheitstourismus ableiten (UBA 2019). Dazu zählt beispielsweise die Zunahme der Schwüleverhältnisse, was sowohl für Südwestdeutschland als auch für die Küstengebiete gilt (Zirkel 2013; Matzarakis und Tinz 2014). Während die Richtlinien weiterhin den gesundheitsdienlichen Merkmalen eines Ortes zuträglich sein müssen, stellt sich aus touristischer Sicht angesichts des Relevanzverlusts des Kuraufenthalts gegenüber beispielsweise gesundheitlichem Präventivtourismus die Frage nach der Bedeutsamkeit eines Kurort-Prädikats für die Destinationswahl (Zirkel 2013). Wie oben erwähnt, ist ein Bedeutungsverlust des Kurtourismus in Deutschland zu verzeichnen, sodass das Kurort-Prädikat bereits heute weniger ausschlaggebend für die Destinationswahl ist. Entsprechend weniger bedrohlich erscheint aus tourismuswirtschaftlicher Sicht vor diesem Hintergrund die Möglichkeit des Prädikatsverlusts infolge klimatischer Veränderungen.

Gegenüber den möglichen Beeinträchtigungen für bestimmte Angebote des Gesundheitstourismus, muss die Zunahme der Wärmebelastung nicht ausschließlich zu Einschränkungen führen. So kann sich die vergleichsweise stärkere Zunahme der Wärmebelastung in urbanen Gebieten (mit hoher Bebauungs- und Bevölkerungsdichte) (siehe „Stadtklima/Wärmeinseln“ im Handlungsfeld „Bauwesen“), die mit gesundheitlichen Belastungen einhergehen kann (siehe 4.2.1) auch stärkend auf die Nachfrage nach gesundheitstouristischen Angeboten auswirken.

Vergleichsweise stärkere Änderungen der für den Gesundheitstourismus-relevanten thermischen Bedingungen sind für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts zu erwarten. Neben Einschränkungen sind in gewissem Maße Gesundheitstourismus-förderliche Auswirkungen abzusehen, wie zum Beispiel eine moderate Zunahme der Lufttemperatur in den deutschen Küstengebieten und eine mit höherer Lufttemperatur korrespondierende Abnahme von Kältestress (Matzarakis und Tinz 2014).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 38: „Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus“

- ▶ Sommerliche Wärmebelastung tritt vergleichsweise häufig entlang der Flusstäler von Rhein, Neckar, Main und Mosel sowie in Südbayern und großen Teilen Sachsens auf.
- ▶ Die Auswirkungen des Lufttemperaturanstiegs infolge des Klimawandels auf die unterschiedlichen Arten des Gesundheitstourismus lassen räumliche Unterschiede erkennen: Während Veränderungen des Bioklimas mit Beeinträchtigungen im Kurtourismus einhergehen können, können sich Temperaturveränderungen teils auch positiv auf den Gesundheitstourismus auswirken.
- ▶ Die rückläufige Entwicklung des Kurtourismus setzt die Bedeutung der Richtwerte-basierten Prädikatsvergabe für Kurorte – die unter anderem unter Berücksichtigung der im jeweiligen Ort auftretenden Wärmebelastung erfolgt – aus tourismuswirtschaftlicher Sicht herab.

3.2.2 Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen

Hintergrund und Stand der Forschung

Neben langfristigen klimatischen Trends können sich auch kurzfristig ändernde Witterungsbedingungen auf das tatsächlich vorhandene touristische Angebot einer Destination auswirken. Die Folgen von Wetterereignissen können dabei von leichten und kurzfristigen Beeinträchtigungen des Angebots bis hin zu mittel- und langfristigen Unterbrechungen des Betriebs reichen. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen können solche Unterbrechungen bei laufenden Kosten existenzbedrohend sein. Treten in Folge eines Wetterereignisses Schäden an touristischen Infrastrukturen auf, ist zusätzlich zu Betriebsunterbrechungen mit Kosten für die Wiederinstandsetzung der Infrastruktur zu rechnen. Schäden können sowohl die allgemeine Infrastruktur als auch touristische Betriebe betreffen (Hahne et al. 2012). Zu touristischen Infrastrukturen zählen neben Beherbergungsbetrieben und Gastronomie auch Wander- und Radwege, Wasser- und Wintersportinfrastrukturen, Transportmöglichkeiten und kulturelle sowie Freizeitangebote. Je nach Art der betroffenen Infrastrukturen treffen die Instandsetzungskosten unterschiedliche Akteursgruppen. So sind beispielsweise Radwege und andere Verkehrsinfrastrukturen meist in öffentlicher Hand, während Schäden bei Tourismusbetrieben meist von privatwirtschaftlichen Unternehmen zu tragen sind. Da neben temporären und reversiblen Schäden in Verbindung mit klimatischen Veränderungen und/oder Extremereignissen auch dauerhafte irreversible Schäden auftreten können, besteht für bestimmte touristisch relevante Orte auch das Risiko, dass Betriebe oder Standorte gänzlich zur Aufgabe der touristischen Nutzung gezwungen sind.

Die klimatischen Einflüsse, die zu Schäden an Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen führen können, sind vielfältig und abhängig vom Angebot und der Destination. An der Küste können Sturmfluten sowohl zu kurzfristigen Unterbrechungen des Betriebs als auch zu schweren

Schäden an Infrastrukturen in Folge von Hochwasserereignissen bis hin zum Verschwinden ganzer Strände führen. Außerdem kann Algenwachstum bei hohen Wassertemperaturen im Sommer Badeverbote nach sich ziehen, beispielsweise an der Ostseeküste oder in Binnengewässern (Heuchele et al. 2014). In Folge von Flusshochwasser können in potenziellen Überflutungsgebieten Einschränkungen des Betriebs und Schäden an Rad- und Wanderwegen, Hotels und Gaststätten sowie Straßen und Gleisen auftreten. Bundesweit können extreme Starkniederschläge zu ähnlichen Auswirkungen führen, von denen alle Tourismusarten betroffen sind. Eine Folge davon können auch Rutschungen und Muren sein, die potenziell betroffene Infrastrukturen gefährden. Gravitative Massenbewegungen können vor allem in Gebirgsräumen zu Schäden an touristischen Infrastrukturen führen. In Folge von Sturmschäden kommt es zudem immer wieder zu Warnungen und zu Sperrungen von Wäldern und Forsten. In diesem Zusammenhang sind außerdem Waldbrände als Risikofaktoren zu nennen (UBA 2019).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Schäden an touristischer Infrastruktur und Betriebsunterbrechungen können in allen Destinationstypen und Tourismusregionen in Deutschland auftreten.

In den Küstengebieten können der steigende Meeresspiegel (um voraussichtlich 0,6 bis 1,1 Meter bis zum Ende des Jahrhunderts, im Falle des RCP8.5) (Oppenheimer et al. 2019) und möglicherweise zunehmende Windstärken (zumindest in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts) beziehungsweise sich jahreszeitlich verlagernde Stürme sowie Sturmfluten Küstenerosion verstärken (siehe „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ und „Sturmfluten“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“), die sich beeinträchtigend auf das touristische Angebot auswirken kann (zum Beispiel können Strandsperrungen Betriebsunterbrechungen nach sich ziehen) (Heuchele et al. 2014). Beispielsweise lassen sich an der nordfriesischen Insel Sylt bereits morphologische Veränderungen aufgrund seeseitiger Erosion beobachten (Huthnance et al. 2016). An der Ostsee sind neben den Außenküsten die für den Tourismus relevanten Inseln und die Halbinsel Fischland-Darß-Zingst besonders von Küstenrückgang und Landverlusten betroffen (The BACC II Author Team 2015). Außerdem können Starkregenereignisse vor allem an Steilküsten und an instabilen Kreidefelsen Erosion und Erdbeben begünstigen (Łabuz 2015) (siehe „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“). Sowohl der Meeresspiegelanstieg als auch möglicherweise an Häufigkeit zunehmende Extremereignisse können überdies Schäden für Tourismus-relevante Hafen- und Strandinfrastrukturen nach sich ziehen (Heuchele et al. 2014) (siehe „Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) beziehungsweise bedarf es für solche Infrastruktur einer entsprechenden Anpassung (zum Beispiel bauliche Maßnahmen, häufige Wartung unter anderem), um die Sicherheit unter anderem von Touristen zu gewährleisten.²²

Auch Extremereignisse, wie konvektive Niederschläge und Starkregen (im Sommer), Flusshochwasser oder Sturm können Beeinträchtigungen insbesondere von touristischen Angeboten im Freien bedingen oder Schäden touristischer Infrastruktur nach sich ziehen (Heuchele et al. 2014). Infolge der mit dem Klimawandel einhergehenden höheren Wasseraufnahmekapazität der Luft, ist zukünftig grundsätzlich mit der Intensivierung von extremen Niederschlagsereignissen zu rechnen, wenngleich bisher keine gesicherten Aussagen zu deren räumlicher Verteilung getroffen werden können (siehe „Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen aufgrund von Starkregen“ im Handlungsfeld „Bauwesen“). Für touristische Infrastrukturen und Angebote im Freien können daraus Einschränkungen oder Unterbrechungen erwachsen. Überdies kann Hoch- und

²² Auf die Möglichkeiten der gezielten Anpassung an den Klimawandel wird in Kapitel 3.3 eingegangen.

Niedrigwasser punktuell zu touristischen Einschränkungen führen, zum Beispiel können Niedrigwasser-bedingte Einschränkungen auch den touristischen Schifffahrtsbetrieb treffen. Des Weiteren sind ab Mitte des Jahrhunderts ein vermehrtes Auftreten von Starkwindereignissen und stärkeren Böen abzusehen, wenngleich Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Windverhältnisse große Unsicherheiten bergen. Solche Starkwindereignisse würden vor allem den Nordseeraum und Nordwestdeutschland betreffen, wobei dies insbesondere für die Wintersaison gelten würde, während für den Sommer eher mit dem entgegengesetzten Trend zu rechnen wäre (Pinto und Reyers 2017). Für die übrigen Regionen Deutschlands wird hinsichtlich des Wind-/Sturmaufkommens von eher unwesentlichen Veränderungen gegenüber den aktuellen Verhältnissen ausgegangen (ebd.) (siehe „Schäden durch Windwurf“ im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“). Jüngere wissenschaftliche Untersuchungen lassen zumindest bis zur Mitte des Jahrhunderts auf eine Abnahme sowohl der Sturmintensität als auch der Sturmtage schließen. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts könnte sich die Sturmintensität dann wiederum erhöhen. Des Weiteren könnte sich eine jahreszeitliche Verlagerung des Sturmaufkommens entwickeln, infolge derer es zu einer stärkeren Überlagerung mit der touristischen Saison kommen könnte (Gonzalez et al. 2019).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 39: „Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen“

- ▶ Stärkere Sturmfluten, Meeresspiegelanstieg und Erosion können den Küstenraum als Tourismusdestination erheblich beeinträchtigen, hohe Kosten verursachen und weitreichende Anpassungen erforderlich machen.
- ▶ Kurzzeitige Wetterextreme, wie Starkniederschläge, Stürme, Trockenperioden oder Hoch- und Niedrigwasser, deren Intensität beziehungsweise Auftreten klimawandelbedingt zunehmen kann, können Unterbrechungen der touristischen Nutzung zum Beispiel von Wander-, Rad-, Waldwegen, Skipisten, Gewässern oder Küstenabschnitten nach sich ziehen.

3.2.3 Verlagerung der Nachfrage

Hintergrund und Stand der Forschung

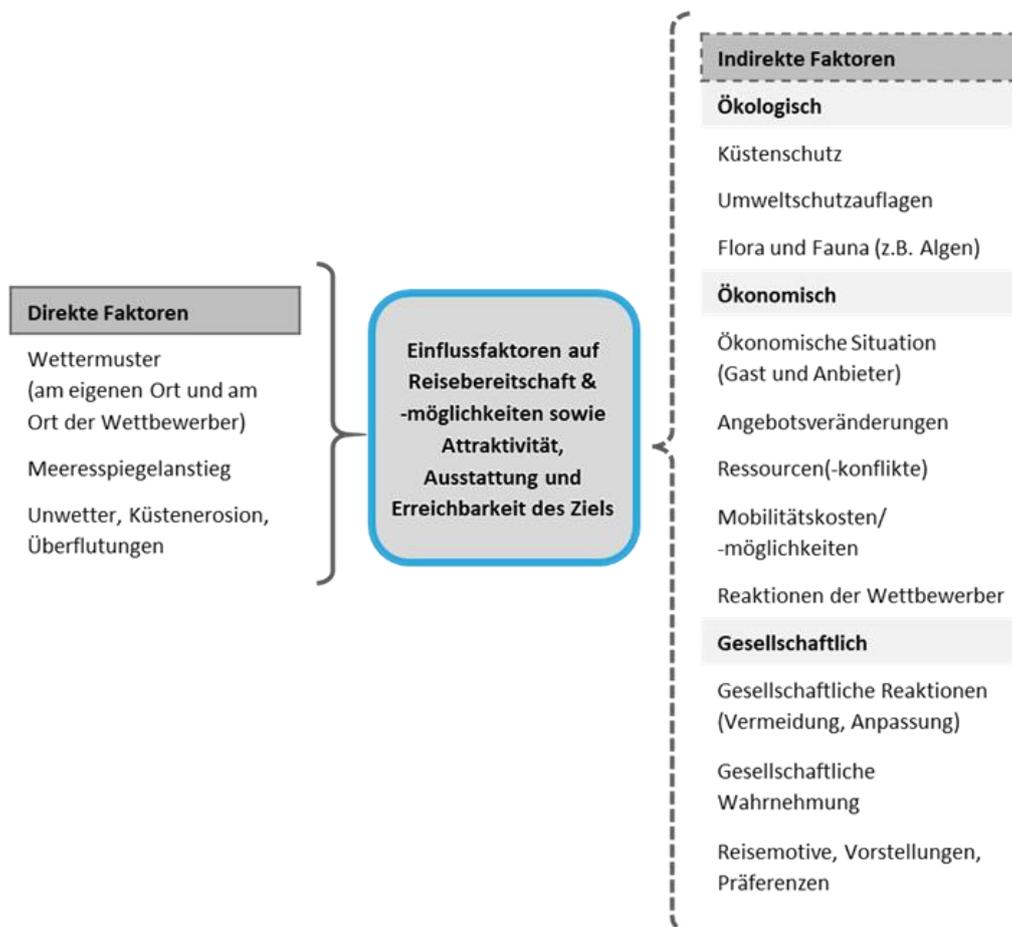
Die Betrachtung der touristischen Nachfrage in den folgenden Ausführungen konzentriert sich auf Reisen, die dem Zweck nach als Urlaubsreisen zu definieren sind. Dieser Nachfragetyp wird hier exemplarisch betrachtet.²³ Hinsichtlich der Verlagerung dieser Nachfrage finden hier deren räumliche, zeitliche und inhaltliche Dimension Berücksichtigung. Das heißt, die Reisedestination kann geändert werden, um zum Beispiel an einem anderen Ort der gewünschten Aktivität nachzugehen; das gleiche gilt für den Reisezeitraum; außerdem kann die Wahl der Aktivitäten selbst

²³ Eine umfassende Auseinandersetzung mit allen Nachfragetypen sprengt den Rahmen dieses Kapitels und entspricht nicht dem Zweck der KWRA 2021.

verändert werden, während weiterhin an denselben Ort gereist wird (Schwirplies und Ziegler 2017).

Entscheidungen für die Nutzung eines bestimmten touristischen Angebots in einer bestimmten Destination (in einem bestimmten Zeitraum) werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, worunter Witterungsbedingungen und klimatische Veränderungen, inklusive der Folgewirkungen, eine Dimension darstellen. Klimatische Veränderungen können sich direkt auf die Nachfrage auswirken oder diese indirekt beeinflussen (Strasdas und Zeppenfeld 2016), beispielsweise im Zusammenhang mit weiterreichenden gesellschaftlichen, politischen oder wirtschaftlichen Veränderungen infolge des Klimawandels (zum Beispiel CO₂-Bepreisung). In welchem Umfang sich solche indirekten Faktoren auf die touristische Nachfrage auswirken werden, kann allerdings im Vorhinein nicht mit Sicherheit bestimmt werden. Das folgende Schaubild (Abbildung 13) gibt einen Überblick über die Nachfrage beeinflussende Faktoren und unterscheidet dabei zwischen direkten und indirekten Einflussfaktoren.

Abbildung 13: Einflussfaktoren auf Reisebereitschaft und -möglichkeiten sowie Attraktivität, Ausstattung und Erreichbarkeit des Ziels (am Beispiel des Küstentourismus)



Quelle: Eigene Darstellung nach Günther 2013

Für viele touristische Angebote gehört das Wetter zu den Eigenschaften, die kurzfristige Änderungen der Nachfrage mit sich bringen können. Dafür ist neben der Variabilität des Wetters die hohe Bedeutung, die eine Mehrheit der Reisenden einem guten Wetter beimessen, verantwortlich (Kreilkamp 2011). Außerdem ist für viele touristische Angebote, wie zum Beispiel Badetourismus und Gesundheitstourismus das Wetter eine Bedingung für die volle Wahrnehmung des Angebots (Matzarakis 2006; Willms 2007; Haller et al. 2011).

Ein großer Teil touristischer Buchungen erfolgt allerdings nicht spontan, sondern eher mittel- und langfristig. Ändern sich das Klima und damit die Statistik des Wetters in einer Destination, kann dies langfristig zu Änderungen der Nachfrage nach bestimmten touristischen Dienstleistungen führen. Eine höhere Variabilität des Wetters und häufigere Extremereignisse, die unter Umständen mit Betriebsunterbrechungen einhergehen können (siehe 3.2.2), wirken tendenziell senkend auf die Nachfrage. Änderungen des mittleren erwarteten Wetters können je nach Richtung des Trends und des betrachteten Angebots in beide Richtungen wirken. Dabei ist zu beachten, dass nicht nur die tatsächlichen Bedingungen, sondern auch die gesellschaftlich kommunizierten Bedingungen und gegebenenfalls in der Vergangenheit gemachte individuelle Wettererfahrungen eine wichtige Rolle spielen (Bausch et al. 2016; Matzarakis und Lohmann 2017). Zudem spielt nicht nur das Wetter in der Destination selbst, sondern auch das Wetter in alternativen Destinationen eine Rolle.

Je nachdem, auf welche Weise das Wetter die Entscheidung für eine Reise beeinflusst, können langfristige klimatische Änderungen dazu führen, dass eine Reise verschoben wird (zeitliche Verlagerung der Nachfrage), dass ein alternatives touristisches Angebot wahrgenommen wird (segmentale Verschiebung der Nachfrage) oder dass die Reise in eine andere Destination stattfindet (räumliche Verlagerung der Nachfrage). Dabei sind auch Kombinationen dieser Verlagerungsdimensionen möglich. Entscheidet sich eine Familie beispielsweise auf Grund hoher Temperaturen an der Ostsee im Juli für einen Wanderurlaub im Mittelgebirge im Oktober, verlagert sich ihr Beitrag zur touristischen Nachfrage sowohl zeitlich als auch segmental und räumlich. Allerdings spielen bei der touristischen Nachfrage viele Einflussfaktoren eine Rolle und befinden sich in einem komplexen Wirkungsgefüge (Heucheles et al. 2014; Matzarakis und Lohmann 2017). Eine Quantifizierung klimabedingter Nachfrageverlagerungen liegt daher bisher nicht vor.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Angesichts der Komplexität von Reiseentscheidungen und den vielfältigen Wegen, auf denen Wetter dabei eine Rolle spielen kann, sind Aussagen zu zukünftigen Änderungen der Nachfrage auf Grund des Klimawandels mit großen Unsicherheiten verbunden. Im Zusammenspiel aller Einflussfaktoren auf die touristische Nachfrage wird der Einfluss des Klimawandels auch in den kommenden Jahren eine nachgeordnete Rolle spielen. Dennoch können zumindest große klimatische Trends hinsichtlich ihres Einflusses auf die Nachfrage eingeordnet werden.

An den deutschen Küsten und an Binnengewässern könnte die projizierte Zunahme der Temperatur (siehe 3.2.2) potenziell zu einer steigenden Nachfrage nach Badetourismus führen. Dabei ist die Annahme naheliegend, dass steigende Temperaturen insbesondere in den frühen und späten Sommermonaten, in denen es derzeit für viele noch nicht warm genug für einen Badeurlaub ist, zu einer Zunahme der Nachfrage nach Badeurlaub führen können. Angesichts der projizierten Zunahme der Hitzebelastung im Sommer (siehe 3.2.2) könnte es in der heißesten Jahreszeit tendenziell zu einer Zunahme der Nachfrage nach touristischen Angeboten in kühleren Regionen kommen. Davon könnten in Deutschland unter anderem die Mittelgebirge profitieren. Wie bereits erwähnt, gilt bei diesen Annahmen der Wirkungszusammenhänge von Temperatur beziehungsweise Hitze und touristischer Nachfrage, dass eine Vielzahl weiterer Faktoren gleichzeitig einen enormen Einfluss haben, nämlich beispielsweise verfügbare Zeit, finanzielle Mittel oder Aktivitätspräferenzen.

In den deutschen Küstengebieten kann sich weiterhin der Meeresspiegelanstieg oder die Überschneidung von Zeiten hoher Sturmintensität mit der Reisesaison auf die touristische Nachfrage auswirken (siehe 3.2.2 und Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“).

Langfristige Änderungen der Nachfrage ergeben sich zudem unter anderem auch durch natürliche und soziale Entwicklungen, die auf nicht-klimabezogene Eigenschaften eines bestimmten Angebots oder die Präferenzen der Reisenden wirken. Dazu gehört unter anderem die erwartete sozioökonomische Entwicklung in Deutschland. Dabei ist auch wieder zu beachten, dass ein touristisches Angebot stets in Konkurrenz zu etlichen alternativen touristischen Angeboten steht und die Nachfrage nach einem touristischen Angebot auch von der Verfügbarkeit und Nachfrage nach alternativen touristischen Angeboten abhängig ist.

Auch die zunehmende Alterung der Gesellschaft verändert die touristische Nachfrage (Lohmann 2015). Die Zunahme Reisender gehobenen oder höheren Alters (über 55 Jahre oder 65 bis 74 Jahre) lässt unter anderem eine steigende touristische Nachfrage in den Bereichen Kultur und Natur vermuten, während die Nachfrage nach Bade- und Ausruhurlaube eher abnehmen könnte (Grimm et al. 2009; Reinhardt 2019). Da ältere Reisende naturnahe Ziele bevorzugen, ist zu erwarten, dass der demographische Wandel einen bereits vorhandenen Trend in Richtung naturnahem Urlaub fortsetzt (Reinhardt 2019). Auch auf die Nachfrage im Wintertourismus hat die Demographie einen Einfluss (Bausch et al. 2016). Dort ist ein deutlicher Rückgang von Wintersporttouristen zu erwarten; Bausch et al. (2016) gehen hier von einer Schrumpfung des Marktes um sechs Prozent bis 2030 und um 20 Prozent bis 2060 aus. Da Menschen im Ruhestand eine unterdurchschnittliche Motivation zum klassischen Sommerurlaub aufweisen, wird auch hier von einer tendenziell abnehmenden Nachfrage ausgegangen, auch wenn Badeurlaub als Reisemotivation zwischen 1998 und 2019 an Bedeutung hinzugewonnen hat (Reinhardt 2019).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 40: „Verlagerung der Nachfrage“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Verlagerung der Nachfrage“

- ▶ Klimawandel-verknüpfte langfristige Veränderungen, wie der Meeresspiegelanstieg, oder ad-hoc/plötzlich auftretende Extremereignisse können bestimmte Arten touristischer Nachfrage direkt beeinflussen.
- ▶ Neben klimatischen Veränderungen wirken sich der demographische Wandel und sozioökonomische Trends entscheidend auf die Nachfrageentwicklung im Tourismussektor aus.
- ▶ Der Einfluss des Klimawandels auf Reiseentscheidungen wird im Gesamtzusammenhang der zahlreichen Faktoren, die die touristische Nachfrage beeinflussen, auch weiterhin eine nachgeordnete Rolle spielen.

3.2.4 Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft

Hintergrund und Stand der Forschung

Die wirtschaftlichen Möglichkeiten der Tourismusbranche werden durch das mögliche Angebot und die Nachfrage beeinflusst. Wie sich die Folgen des Klimawandels auf einzelne touristische Anbieter oder bestimmte Destinationen auswirken, wird somit unter anderem von den Faktoren beeinflusst, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurden.

Die Betrachtung der wirtschaftlichen Chancen und Risiken des Tourismus stellt die Anbieterseite in den Vordergrund. Das Angebot umfasst dabei Beherbergung, Versorgung, Transport, sowie die Veranstaltung von Reisen oder bestimmten Aktivitäten im Bereich Sport, Erholung, Freizeit und Kultur. Anbieter touristischer Dienstleistungen können nach Größe und Spezialisierungsgrad unterschieden werden. Außerdem umfasst die Anbieterseite aus tourismuswirtschaftlicher Sicht zum einen die betriebliche Ebene und weist zum anderen auch eine räumliche Dimension auf, das heißt, Städte oder Regionen können als Tourismusdestinationen und somit Anbieter gelten. Anhand dieser Merkmalsdifferenzierung werden die neuen Perspektiven und Risiken der Akteure in der Tourismuswirtschaft klarer ersichtlich. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Folgen des Klimawandels tendenziell eine umso größere Wirkung auf einen Anbieter einer touristischen Dienstleistung haben, je weniger dieser in der Lage ist, sich auf Veränderungen einzustellen. Außerdem sind Anbieter potenziell umso stärker durch den Klimawandel betroffen, je größer die Bedeutung des Wetters für ihr Angebot ist und je stärker sie an eine Region gebunden sind. Anbieter haben einen Vorteil, wenn sie ein vielfältigeres Angebotssportfolio aufweisen und/oder über mehrere Standorte in verschiedenen Regionen verfügen, die möglicherweise unterschiedlich von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen wären (Heuchele et al. 2014). Der Fokus der folgenden Ausführungen richtet sich auf klimawandelverknüpfte wirtschaftliche Risiken und neue Perspektiven des Tourismus aus der Sicht von Tourismusdestinationen (also nicht auf betrieblicher Ebene).

Neben dem räumlichen Muster der zu erwartenden Klimaveränderungen sind die Vielfältigkeit des Angebots und die Sensitivität des Angebots gegenüber dem Wetter auch wichtige Faktoren bei der Frage, wie stark sich der Klimawandel potenziell auf einzelne Destinationen in Deutschland auswirken wird. Dabei ist zu beachten, dass der Klimawandel in vielen Destinationen sowohl zu neuen Perspektiven als auch zu neuen Risiken führen kann, über die oft noch wenig bekannt ist und zu denen Aussagen nur mit größeren Unsicherheiten möglich sind (Becken und Hay 2011; Heuchele et al. 2014). Weiterhin spielt die Entwicklung von Tourismusdestinationen außerhalb Deutschlands, mit denen Destinationen in Deutschland in Konkurrenz stehen, eine wichtige Rolle. Auch dort können sich klimatische Änderungen und damit verknüpfte Wirkungen auf die naturräumliche Ausstattung (zum Beispiel Landschaftsbild, Luft- und Wassertemperaturen und vielen mehr) und damit auch auf die Bedingungen für touristische Nutzungsmöglichkeiten auswirken.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Sich wandelnde klimatische Bedingungen und Witterungsverhältnisse schränken touristische Angebote bereits ein und können in bestimmten Gebieten dazu führen, dass einzelne touristische Angebote nicht aufrechterhalten werden können. Die Faktoren für die Betroffenheit der Wirtschaftlichkeit touristischer Angebote unterscheiden sich in ihrer jeweiligen Relevanz je nach Region. Das heißt, Temperatur, thermische Eignung, Behaglichkeit, Niederschlag, Gewässerqualität, Schwüle, Kältereiz sind je nach Regionalkategorie beziehungsweise Destinationsart unterschiedlich ausschlaggebend (Heuchele et al. 2014).

Für die Küstengebiete ist mit einem moderaten Anstieg der Lufttemperatur und einer Zunahme der Luftfeuchtigkeit beziehungsweise der Schwülebedingungen zu rechnen. Gleichzeitig nehmen die Tage mit thermischer Behaglichkeit zu und die Kältebelastung nimmt – gemessen in der Anzahl der Tage – ab. An der Ostsee kommen Tage mit thermischer Eignung²⁴ bereits gegenwärtig in höherer Anzahl vor (verglichen mit der Nordseeküste). Weiterhin nehmen sowohl Tage mit viel Niederschlag als auch Tage ohne Niederschlag zu. Die Ostseeküste wird in dieser Hinsicht – aus touristischer Sicht – begünstigter sein als die Nordseeküste, das heißt, für die Ostseeküste ist mit einer höheren Anzahl von Tagen ohne Niederschlag zu rechnen (Matzarakis und Tinz 2014). Für den Badetourismus an den deutschen Küsten bergen die sich wandelnden klimatischen Verhältnisse neben neuen Möglichkeiten auch Risiken. Einerseits kann bis zur Mitte des Jahrhunderts insgesamt zwar von einer Ausweitung der Badesaison ausgegangen werden; andererseits steht dieser möglichen positiven Entwicklung für die Tourismuswirtschaft die Verminderung der Badegewässerqualität gegenüber. Die Beeinträchtigung der Wasserqualität infolge des Meerestemperaturanstiegs, der Versauerung (unter anderem durch den verstärkten Eintrag von CO₂ in Oberflächengewässer infolge der erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre) und des abnehmenden Salzgehalts (siehe „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) kann die touristische Nachfrage in deutschen Küstengebieten senken und sich negativ auf das touristische Angebot in dieser Region auswirken. Beispielsweise treten Cyanobakterien, welche für den Menschen ein Gesundheitsrisiko darstellen können, bei höheren Wassertemperaturen verstärkt auf (sowohl in Meeres- als auch in Binnengewässern) (Pilotto et al. 1997). Dabei ist gleichzeitig zu bedenken, dass mildere Winter die Durchmischung des Wasserkörpers einschränken können, womit eine geringere Nährstoffverfügbarkeit und damit ein gehemmtes Blaualgenwachstum einhergehen (Meinke und Reckermann 2012). Potenziell gesundheitsgefährdend für den Menschen sind außerdem Vibrionen, deren Verbreitung sowohl von der Temperatur als auch vom Salzgehalt des Wassers abhängt. Dementsprechend kann die Vibrionenverbreitung für den Badetourismus an der Ostsee von höherer Bedeutung sein (siehe 4.2.3). Die Herabsetzung der Badegewässerqualität betrifft neben den Küstengewässern auch Binnengewässer und das touristische Potenzial von Seengebieten. Auch hier bedingt die Zunahme der Lufttemperatur aber gleichzeitig auch eine höhere thermische Eignung für den Badetourismus (Matzarakis und Tinz 2014).

Risiken für die Tourismuswirtschaft in den deutschen Küstengebieten könnten außerdem aus dem Anstieg des Meeresspiegels (ab der Mitte des Jahrhunderts) und aus den Folgen häufigerer Extremereignisse, wie Stürmen oder Starkregen erwachsen. Zum einen ist der Umgang mit solchen kurz- und langfristigen Veränderungen mit hohen (finanziellen) Kosten verbunden. Zum anderen könnten sowohl der Meeresspiegelanstieg als auch häufigere Starkregen- und Sturmereignisse mit erheblichen Veränderungen oder dem Verlust touristisch nutzbarer Flächen oder Landschaftsformen, die das touristische Potenzial steigern, einhergehen (insbesondere entlang der touristisch intensiv genutzten Küstenlinie an der Nord- und Ostsee, inklusive wertvoller Ökosysteme, wie küstennaher Watt- und Feuchtgebiete, sowie Strand- und Dünenlandschaften) (siehe „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) (Heuchele et al. 2014). Dabei können unter anderem Attraktivitätsverluste eine Rolle spielen. Beispielsweise könnte durch die Erhöhung von Schutzbauten der Meeresblick beeinträchtigt werden.

²⁴ Tage mit thermischer Eignung ist hier bezogen auf die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur), eine bioklimatisch relevante Größe, ebenso wie die gefühlte Temperatur, die als Bewertungsindex verwendet wird (insbesondere in der Human-Biometeorologie), das heißt, zur Klassifizierung des thermischen Empfindens des Menschen; die PET hängt eng mit der Lufttemperatur, dem Dampfdruck, der Windgeschwindigkeit und der mittleren Strahlungstemperatur zusammen; sie liefert deswegen eine genauere Information zum menschlichen Empfinden als es durch einen reinen Temperaturwert möglich wäre; laut (Matzarakis und Tinz 2014) ist thermische Eignung folgendermaßen eingegrenzt: 18°C < PET < 29°C

In Mittelgebirgen lässt sich eine gewisse Tendenz zu ökonomischen Verlusten aufgrund der abnehmenden Schneesicherheit und Skitauglichkeit beziehungsweise der abnehmenden Nachfrage nach Skisportangeboten sowohl infolge der verminderten Eignung von Mittelgebirgslagen als Skigebiete als auch bedingt durch den demographischen Wandel ab (Witting und Schmude 2019). Nicht in jedem Fall können die wirtschaftlichen Verluste im Wintertourismus gänzlich durch den Sommertourismus kompensiert werden (Basseur et al. 2017). Nichtsdestotrotz könnten aus der Verschiebung von Jahreszeiten, insbesondere aus der Verlängerung der Sommer- und Herbstsaison unter anderem in Mittelgebirgen, auch neue wirtschaftliche Perspektiven für den Tourismus erwachsen, da touristische Aktivitäten im Freien (zum Beispiel Wandern, Klettern, Mountainbiking, Radfahren) über einen längeren Zeitraum im Jahr angeboten werden könnten (Matzarakis und Tinz 2014; Bausch et al. 2016). Außerdem kann zur Weiterführung der touristischen Nutzung in Mittelgebirgslagen, in denen Skitourismus möglicherweise nur noch eingeschränkt möglich sein wird, zum Beispiel im Schwarzwald, auch eine Angebotsverlagerung zum Beispiel zu Mountainbiking und Wandern im Winter (an geeigneten Tagen) vorgenommen werden (Basseur et al. 2017). Auch in den deutschen Alpen könnten sich ökonomische Verluste aus dem Rückgang der Nachfrage nach skitouristischen Aktivitäten in deutschen Skigebieten ergeben (die in Konkurrenz zu schneesichereren Gebieten zum Beispiel in Österreich, der Schweiz oder Italien stehen). Hierbei ist nicht nur die abnehmende Schneesicherheit ausschlaggebend. Bedeutsam sind auch die ökologischen und ökonomischen Nachteile, die sich aus Gegenmaßnahmen, also zum Beispiel künstlicher Beschneigung ergeben könnten. Die negativen Auswirkungen auf Umwelt und Landschaftsbild sowie die sich auf die Preise für Touristen niederschlagenden Kosten von künstlicher Beschneigung könnten die Attraktivität einer solchen Destination als Ski-gebiet mindern beziehungsweise nicht unbedingt zur Aufrechterhaltung eines gleichwertigen touristischen Angebots beitragen (Bausch et al. 2019).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 41: „Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch
Gewissheit		mittel		hoch	

Kernaussagen zu „Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft“

- ▶ Auf den Küsten- beziehungsweise Badetourismus kann sich einerseits die Ausweitung der Badesaison positiv auswirken, andererseits kann sich die gleichzeitige Minderung der Badegewässerqualität beeinträchtigend auswirken. Zudem muss sich der Tourismus an der Küste langfristig auf einen steigenden Meeresspiegel einstellen, der in Zukunft umfassende Wiederherstellungs- und Anpassungsmaßnahmen erfordern dürfte.
- ▶ Aktuell übliche touristische Angebote in bestimmten Regionen (mit bestimmter naturräumlicher Ausstattung) werden infolge klimatischer Veränderungen eher von Einschränkungen betroffen sein, zum Beispiel der Wintersporttourismus in den westlichen und südwestlichen Mittelgebirgslagen.
- ▶ Wiederum können andere touristische Angebote im Freien in einem längeren Gesamtzeitraum pro Jahr angeboten werden, zum Beispiel Wander- oder Radtourismus.

3.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ kann sowohl auf der Nachfrage- als auch auf der Angebotsseite ansetzen. Entscheidende Ansatzpunkte sind dabei die Faktoren, die einerseits nachfrage- und andererseits angebotsseitig die Sensitivität gegenüber den Folgen des Klimawandels beeinflussen. Außerdem spielt, insbesondere aufseiten der Tourismusanbieter, die räumliche Exposition gegenüber bestimmten (sich verändernden) Witterungsbedingungen und jahreszeitlichen Mustern eine wichtige Rolle für die tatsächliche Betroffenheit der Angebotsseite.

Räumlich besonders exponiert sind Angebote, die von Witterungsbedingungen abhängen, die unter Klimawandelbedingungen seltener vorkommen – also beispielsweise wintersport-/skitaugliche Schneemengen und Schneehöhen in Mittelgebirgen oder in den (deutschen) Alpen – oder Angebote, die an bestimmte Landschaftstypen geknüpft sind, die sich klimawandelbedingt deutlich verändern könnten wie zum Beispiel in Küstengebieten angesichts des Meeresspiegelanstiegs (Filies 2012; Hahne et al. 2012). Auch jene Angebote, die durch das potenziell häufigere Auftreten von Extremereignissen wie Hochwasser, Trockenheit oder Starkwind beeinträchtigt sind, beispielsweise Boots- und Radtourismus in Flussgebieten oder Wandertourismus, weisen eine hohe räumliche Exposition auf (Kreilkamp et al. 2013; Heucheles et al. 2014).

Aufseiten des touristischen Angebots hängt die Sensitivität gegenüber klimawandelbedingten Einschränkungen und Nachfrageveränderungen von der baulichen, organisatorischen und finanziellen Vorsorge der Anbieter (Risikomanagement) und von deren Spezialisierungsgrad und Wetterabhängigkeit ab. Ist die Gesamtwertschöpfung durch den Tourismus in einer Region besonders hoch und sind die Anbieter gleichzeitig sehr spezialisiert, birgt dies großes Schadenspotenzial, wenn bestimmte Angebote klimawandelbedingt ausfallen, also zugrundeliegende Witterungsverhältnisse oder landschaftliche Ausprägungen verschwinden. Außerdem beeinflussen die Standortbindung sowie der Zustand und die Ausstattung touristischer Infrastrukturen die Sensitivität auf der Angebotsseite (Heucheles et al. 2014; Schwirplies und Ziegler 2017; Dworak et al. 2020). Zu solchen Ausstattungsmerkmalen gehören zum Beispiel Möglichkeiten zur künstlichen Beschneidung oder des Schneespeicherns im Skitourismus (Bausch et al. 2017).

Wie empfindlich die touristische Nachfrage ist, hängt von den Möglichkeiten der Zielgruppe ab, Urlaubsaktivitäten und Reisezeiten frei zu wählen und räumliche Distanzen zu überwinden. Reiseentscheidungen gelten als multikausal. Sie sind von individuellen Vorlieben und gleichzeitig von sozio-demographischen und ökonomischen Faktoren abhängig und sind außerdem sehr heterogen (Bausch et al. 2019; UBA 2019; Dworak et al. 2020). Dementsprechend schwierig ist es, Reiseentscheidungen im Vorhinein einzuschätzen oder gezielt zu steuern. Dies erschwert auch steuernde Eingriffe im Sinne der Klimaanpassung auf Nachfrageseite erheblich. Die Ausführungen zu Anpassungsprozessen und -möglichkeiten in der Tourismuswirtschaft konzentrieren sich daher auf die Seite des Angebots.

3.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Aufseiten der Tourismusanbieter erfordern unter anderem klimawandelbedingte Einschränkungen des touristischen Angebots, wie im Skitourismus, oder Betriebsunterbrechungen beispielsweise aufgrund der Beschädigung touristischer Infrastrukturen durch Extremwetterereignisse, deren Häufigkeit infolge des Klimawandels zunehmen kann, die Fähigkeit sich anzupassen. Außerdem ist auf Nachfrageveränderungen zu reagieren. Aufgrund der Witterungs- und Nachfrageabhängigkeit des touristischen Angebots beziehungsweise bestimmter Tourismussegmente (Rad-, Wander-, Bade-, Winterurlaube) (Filies 2012; Hahne et al. 2012; Kreilkamp et al. 2013),

sind die Übergänge zwischen den im Tourismus etablierten Mechanismen des Risikomanagements (siehe oben) und Vorsorgestrategien im Sinne der Anpassung an den Klimawandel und an dessen Folgen fließend. So beeinflusst die Möglichkeit der Flexibilität in der Angebotsgestaltung bereits die Sensitivität touristischer Angebote gegenüber wirtschaftlichen Einbußen infolge von Nachfrageschwankungen, temporär ungünstigen Witterungsbedingungen oder bereits eintretenden klimawandelbedingten Einschränkungen und damit einhergehenden Veränderungen der touristischen Nachfrage. Die Abwägung zwischen Spezialisierung und Diversifizierung, also beispielsweise graduelle Angebotserweiterungen sind auch für den weiteren Anpassungsprozess von Bedeutung.

Weitere bereits in Umsetzung befindliche Strategien und einzelne Maßnahmen, die auch Klimaanpassungscharakter erkennen lassen und dementsprechend auszubauen wären, umfassen unter anderem die Aufklärung und Sensibilisierung von Tourismusakteuren – beispielsweise Anbieter oder Verbände (Dworak et al. 2020) – sowie die strukturierte Vorbereitung auf Extremereignisse und Katastrophenfälle, in dessen Zusammenhang Touristinnen und Touristen in Evakuierungen einbezogen werden müssten. Ein Beispiel für eine bereits praktizierte Art des Umgangs mit solchen Situationen ist die Informationsverbreitung in touristischen Küstengemeinden im Falle von Vibrionenfunden oder sturmflutbedingten Strandsperrungen.²⁵ Auch werden bereits verstärkte Anstrengungen zum Unterhalt bestimmter touristischer Infrastrukturen unternommen, beispielsweise beim Erhalt und Ausbau von Rad- und Wanderwegen (Thomas 2017).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Im Rahmen des Aktionsplans Anpassung (APA III) sind zur Anpassung des Tourismussektors folgende Maßnahmen/Instrumente vorgesehen, die alle als Daueraufgaben angelegt und umzusetzen sind (Bundesregierung 2020):

- ▶ Leitfäden zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen bereitstellen, beispielsweise für die Erarbeitung von Notfall-/Evakuierungsplänen: Insbesondere kurzzeitige Wetterereignisse können (Katastrophen-)Situationen zur Folge haben, die auch die Tourismuswirtschaft und Reisende betreffen. Krisenpläne sollten daher auch diese Zielgruppen berücksichtigen. Die Tourismuswirtschaft kann hier als Schnittstelle zwischen Kommunen und Reisenden fungieren. Zudem bedarf es sowohl zur Reiseplanung als auch im Fall der Betroffenheit von einem Extremwetterereignis während des Reisens verlässlicher Informationsquellen, ob in ein Gebiet gereist werden kann/sollte beziehungsweise wie eine betroffene Region zu verlassen wäre, ob eine Evakuierung erfolgen kann und/oder die Versorgung gesichert wird. (APA III: 5.5)
- ▶ Regionaler Klimaatlas²⁶: Informationen zu Klimatelementen und möglichen Veränderungen auf regionaler Ebene sind online abrufbar (APA III: 7.31)
- ▶ Klimanavigator²⁷: Klima- und Umweltinformationen, Wissen zu Anpassungsoptionen und Hinweise zu einschlägigen Organisationen und Einrichtungen stehen in diesem Webportal zur Verfügung (APA III: 7.32)
- ▶ Meteorologische Daten zur Verfügung stellen und Klimaanpassungsberatung anbieten und durchführen: die bundesweit relevante Einrichtung hierfür ist das „Climate Data Center“ des Deutschen Wetterdienstes (APA III: 7.33)

²⁵ Siehe auch: https://www.eucc-d.de/tl_files/eucc/pdf/Aktuelle%20Projekte/KliWaKom/Leitfaden%20Notfallkommunikation%20in%20touristischen%20Kuestengemeinden_final.pdf

²⁶ Siehe auch: www.regionaler-klimaatlas.de

²⁷ Siehe auch: www.klimanavigator.de

Zusätzlich zum Klimadatenzentrum und Beratungsservice des Deutschen Wetterdienstes steht zur Unterstützung des Tourismusmanagements bereits ein Informationssystem über die klimatischen Bedingungen in deutschen Reisegebieten zur Verfügung.²⁸

Aus den bisher umgesetzten Anpassungsmaßnahmen sowie den laut APA III beschlossenen Maßnahmen wird ersichtlich, dass der Fokus bei Anpassungsaktivitäten in der Tourismuswirtschaft zunächst vor allem auf die Bereiche Wissen sowie Motivation und Akzeptanz (Informationsverbreitung, Vertiefung des Kenntnisstands, Bewusstseinsstärkung) gerichtet ist.

Weiterreichende Anpassung

Über die beschlossenen Maßnahmen (APA III) hinausgehend sind – angebotsseitig – weitere Aktivitäten und Konzepte als Bestandteile von Anpassungsprozessen im Tourismussektor denkbar. Solche weiterreichenden Möglichkeiten der Anpassung können sowohl auf Ebene der Destinationsmanagementorganisationen (DMO) als auch auf betrieblicher (privatwirtschaftlicher) Ebene ansetzen.

Auf Anbieterseite, teils auch auf der Ebene einzelner Anbieter, stellt die Angebotsdiversifizierung eine essentielle Strategie dar, um mit potenziell eintretenden (aber mit Unsicherheit verbundenen) Veränderungen umzugehen und Risiken aufgrund von Produktabhängigkeit zu verringern. Anwendung finden Diversifizierungs- und Ganzjahresangebotsstrategien bereits in Wintertourismusdestinationen in deutschen Mittelgebirgen, wo aufgrund der gesunkenen Schneesicherheit bereits Handlungsbedarf besteht (Dümecke et al. 2013; TMUEN 2019). Konkret zählt dazu beispielsweise die Angebotserweiterung um Mountainbiking oder Wandern und der Ausbau der entsprechenden Strecken- und Wegenetze, wofür außerhalb der Skisaison (oder bei deren Ausbleiben) insbesondere auf das bereits vorhandene Pisten- und Loipennetz zurückgegriffen wird. Auch die zugehörige technische Infrastruktur (Seil-, Bergbahnen, Liftanlagen) wäre dann so zu konzipieren, dass sie für winterliche/schneespezifische und sommerliche Outdoor-Aktivitäten nutzbar ist. Beispielsweise bietet sich die Doppelnutzung von Liftanlagen an, sodass diese außer für Skifahrer auch für Radfahrer nutzbar wären (Spiekermann und Franck 2014; TMUEN 2019).

An den vorrangig für Wintertourismus, insbesondere Skisport, genutzten Standorten in den deutschen Alpen wird Klimaanpassung bisher hingegen vor allem mithilfe technischer Maßnahmen vollzogen (Schneemanagement, künstliche Beschneigung, siehe oben). Da diese Option mit weiter sinkenden Schneehöhen und Schneefall-Tagen pro Jahr (wie für die kommenden Jahrzehnte angenommen) zumindest an nicht sehr hoch gelegenen Standorten zunehmend an wirtschaftlicher Attraktivität und auch an Akzeptanz auf Nachfrageseite verliert, ist eine stärkere Fokussierung auf die Angebotsdiversifizierung an diesen Standorten erforderlich (Bausch et al. 2017). Darunter fällt beispielsweise der Ausbau touristischer Infrastruktur für Ganzjahresaktivitäten wie Wandern, Walking, Radsport und/oder für schneelagen-/witterungsunabhängige Sport-, Fitness- und gesundheitsorientierte Aktivitäten, um neue Zielgruppen zu erschließen (Spiekermann und Franck 2014; StMUV 2016). Zur Refokussierung der touristischen Angebotsausrichtung kann auch der Ausbau des kulturellen Angebots oder die Vermarktung regionaler Produkte – zum Beispiel Kulinarik, Geschichte, Naturprodukte – gehören (Kobernuß und Schrahe 2015; StMUV 2016).

Die Angebotsdiversifizierung als Anpassungsstrategie ist auch an anderen Tourismusdestinationen (nicht nur Wintertourismusstandorten) relevant, beispielsweise auch an von den Folgen des Meeresspiegelanstiegs betroffenen Küstenregionen (Thomas 2017) oder in Wandertourismusfokussierten Destinationen, deren Attraktivität aufgrund der Hitze- und Trockenheitsschäden

²⁸ Siehe auch: <https://gis.uba.de/maps/resources/apps/tourismus/>

bereits gemindert ist oder künftig zurückgehen könnte. Gleichzeitig könnten Reiseentscheidungen möglicherweise häufiger zugunsten von Standorten ausfallen, die auch im Sommerhalbjahr gemäßigt temperiert sind, wie deutsche Mittelgebirge oder Küstenregionen (Dümecke et al. 2013). Um bei temporären Spitzenauslastungen dennoch eine Entzerrung zu ermöglichen, wären Entwicklungskonzepte vonnöten, die auch den Schutzanforderungen (touristisch beliebter) sensibler Naturräume gerecht werden (Spiekermann und Franck 2014).

Da landschaftlicher Reiz als ein wichtiges Kriterium bei Reiseentscheidungen gilt, stellen der Schutz intakter Ökosysteme und damit auch der Erhalt reizvoller (natürlicher und Kultur-)Landschaften unter Klimawandelbedingungen auch eine Komponente der Anpassung im Tourismusbereich dar (Splitter 2001; Aschenbrand 2017). Mehrere unter anderem im APA III verankerte oder durch Bundesgesetze geregelte Instrumente können hierzu bereits einen Beitrag leisten, weisen aber auch noch Spielraum hinsichtlich der Vertiefung und Erweiterung sowie der beschleunigten Umsetzung auf (Streitberger et al. 2016; BfN 2019). Zu diesen Instrumenten zählen das auf die Herstellung ökologischer Durchgängigkeit in Gewässern und Landschaften abzielende „Bundesprogramm Biologische Vielfalt“ (APA III: 3.8), das Bundesprogramm Wiedervernetzung, die FFH-Richtlinie und die Umsetzung des bereits durch das Bundesnaturschutzgesetz vorgeschriebenen nationalen Biotopverbunds (APA III: 3.2). Die konsequente und flächendeckende praktische Umsetzung solcher Programme und die weitere Konkretisierung entsprechender Maßnahmen kann zum Erhalt von Lebensräumen beitragen und damit Überlebensmöglichkeiten für heimische Arten verbessern, was auch bedeutende Faktoren für den Tourismus in Deutschland sind.

Grundsätzlich stellt die Wirtschaftlichkeit bei der Angebotsneuausrichtung aus Sicht der involvierten Betriebe und möglicherweise Finanzmittel-bereitstellenden Institutionen oder Investoren ein handlungsleitendes Prinzip dar. Bei der Verlagerung auf neue Angebote, die möglicherweise auch die Planung und Schaffung entsprechender Infrastrukturen umfassen (beispielsweise Ausbau des Rad- und Wanderwegenetzes, Mountainbike- und Skating-Strecken, Umrüstung von Skiliftanlagen für die Nutzung mit dem Fahrrad), gilt es daher Entwicklungen auf Nachfrageseite, also mögliche Veränderungen der Interessenlagen, der Ansprüche an Destinationen oder der Vorlieben bei der Gestaltung des Aktivitätsspektrums während einer Reise, genau in den Blick zu nehmen (Thomas 2017; Dworak et al. 2020). Wie eingangs erwähnt, hängen Reiseentscheidungen stark mit sozio-demographischen Merkmalen und wirtschaftlichen Umständen zusammen und zeichnen sich durch ihre enorme Heterogenität aus. Dies mindert die Einschätzbarkeit zukünftiger Nachfrageentwicklungen, untermauert aber die Bedeutung einer möglichst vielseitigen Angebotsgestaltung beziehungsweise flexiblen Angebotsorganisation.

Weitere mögliche Maßnahmen sind Personalschulungen bei Destinationsmanagementorganisationen sowie die Qualifizierung von Tourismusunternehmen²⁹ zur Entwicklung von Klimaanpassungskonzepten. Hilfreich ist ferner die Integration von klimaanpassungsorientierten Strategien und Einzelaktivitäten in bestehende Planungen und Managementkonzepte der Destinationsmanagementorganisationen (Dworak et al. 2020). Während die wichtigen Impulse für Anpassungsprozesse von Destinationsmanagementorganisationen ausgehen sollten, beruhen Anpassungsprozesse im Tourismussektor auf dem Zusammenspiel verschiedener Akteure, wie Gastronomie und Beherbergung, Reisevermittler, Tourismusverbände, Lokalbehörden sowie außerbehördliche Akteure aus Land- und Forstwirtschaft, Natur- und Landschaftsschutz, Wasserversorgung, Verkehrsbetriebe, Einzelhandel und dem Kultursektor (StMUV 2016; Ahlhorn und Meyerdirks 2017; Ahlhelm et al. 2020; Dworak et al. 2020). Beispielsweise ist bei der Planung von Angebots-erweiterungen, die mit der Nutzung von Wasserressourcen oder mit dem Ausbau touristischer

²⁹ Siehe auch: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/qualifizierung-von-tourismusunternehmen-zur>

Infrastruktur wie dem Wander- und Radwegenetz, Nordic-Walking-Wegen, Mountainbike-, Skater- oder Rollski-Strecken durch Wälder oder andere potenziell schützenswerte Landschaft einhergehen, die Abstimmung mit Naturschutzbehörden, Land- und Forstwirtschaftsvertretern und Wasserverbänden/-versorgern notwendig. Dies gilt verstärkt, wenn zukünftig unter anderem der schonende Umgang mit Wasserressourcen im Tourismus an Bedeutung zunehmen wird (Gössling und Peeters 2015; Dworak et al. 2020). Auch die Ausrichtung auf Ganzjahresangebote, was eine intensivere Beanspruchung bestimmter Flächen, Wälder, Wege nach sich zieht, erfordert bereits in der Planungsphase die Abstimmung zwischen Tourismusakteuren und den Fachbehörden auf kommunaler Ebene (Dümecke et al. 2013). Wenn im Sinne der Diversifizierung beispielsweise kulturelle Besonderheiten einer Region wie Kulinarik, lokales Handwerk oder Brauchtum stärker in das touristische Angebot einbezogen werden sollen, bedarf es der Koordination und Kooperation zwischen Tourismusanbietern, Einzelhandel, Gastronomie und Kulturschaffenden (StMUV 2016; Schmidt 2019).

Seitens der (potenziell) Reisenden stellen Informationsverbreitung und Wissensvermittlung wichtige Schritte dar, um auf Anpassung hinzuwirken, da diese eng an den Kenntnisstand beispielsweise über (klimabedingte) Veränderungen der naturräumlichen Bedingungen und entsprechende Veränderungserfordernisse des Aktivitätsspektrums an bestimmten Destinationen geknüpft ist. Anpassung von Seiten der potenziell Reisenden hängt aber auch von der Bereitschaft ab, andere Reiseentscheidungen zu treffen oder anderen Urlaubsaktivitäten nachzugehen, wenn (naturräumliche) Veränderungen in Zielgebieten auch wesentlich durch bestimmte Reise- und Konsumententscheidungen bedingt sind. Beispielsweise betrifft dies bisherige Wintersportorte, die sich aufgrund geringerer winterlicher Schneemengen nicht mehr für die Ausübung der gewohnten Wintersportarten eignen.

Vor dem Hintergrund dieser hier skizzierten Möglichkeiten der Anpassung erscheinen organisatorische Maßnahmen sowie Wissens-schaffende Maßnahmen (vor allem als Entscheidungsgrundlagen), also Informationsbereitstellung und adressatenorientierte Kommunikation über aktuelle Erkenntnisse zu klimawandelbedingten naturräumlichen Veränderungen in Tourismusdestination, und damit Akzeptanzschaffung und die Verbreitung von Motivation zur Anpassung als wesentliche Komponenten von Anpassungsstrategien. Daneben sind finanzielle Ressourcen, auch unter Zuhilfenahme finanzieller Förderungen von Kommunen, Ländern, dem Bund oder der EU, von hoher Bedeutung, um Destinationsmanagementorganisationen und Anbieter bei der Konzeptentwicklung zur Neuausrichtung und Angebotserweiterung zu unterstützen und Investitionen zu solchen Zwecken zu fördern (Dworak et al. 2020).

Die hier genannten beschlossenen Maßnahmen (APA III) und weiterreichenden Möglichkeiten, um Anpassung zu gestalten, haben einen Zeithorizont (von der Initiierung bis zum Wirksamwerden von Maßnahmen) von mehreren Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten. Zwar werden Veränderungen oder Neuerungen von Angeboten im Tourismus teilweise kurzfristig, das heißt saisonal oder jährlich, vorgenommen. Zum Teil sind aber auch langfristige Planungen und Abstimmungsprozesse mit verschiedenen Akteuren erforderlich, beispielsweise beim Ausbau touristischer Infrastrukturen. Teilweise können Anpassungsprozesse im Tourismussektor auch mithilfe beziehungsweise unter Beteiligung der räumlichen Planung vollzogen werden (siehe 3.3.3), was dann mit einem höheren Zeitaufwand einherginge.

3.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Klimawandelbedingte Einschränkungen des touristischen Angebots, insbesondere bezogen auf den Sommer-/Küsten-/Badetourismus, Rad- und Wander- sowie Gesundheitstourismus, sind mit den Klimawirkungen Hitzebelastung, UV-Strahlungsbelastung und dadurch bedingte Gesundheitsschädigungen, allergische Reaktionen und Verbreitung möglicher Überträger von

Krankheitserregern verknüpft (Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Betriebsunterbrechungen und die Belastung beziehungsweise Zerstörung touristischer Infrastruktur weisen Bezüge zu Klimawirkungen in den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (Niedrig- und Hochwasser, Wasserqualität), „Küsten- und Meeresschutz“ (Naturräumliche Veränderungen an Küsten, Höhere Belastung oder Zerstörung von Küstenschutzsystemen, Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in niedrig gelegenen Gebieten, Sturmfluten) sowie „Wald- und Forstwirtschaft“ auf.

Aufgrund dieser Wirkbeziehungen bestehen auch Bezüge zu Anpassungsaktivitäten und -möglichkeiten, die in anderen Handlungsfeldern relevant sind, beispielsweise Beschattung (von Rad- und Wanderwegen), um Hitzebelastung und UV-Strahlungsexposition einzugrenzen (Dworak et al. 2020). Ebenso bedarf es der Informationsverbreitung über die teilweise gesundheitsgefährdende Beeinträchtigung der Badegewässerqualität infolge von Niedrigwasser und Hitze oder infolge von verstärktem Bakterienvorkommen. Des Weiteren kann durch gezielte Information der Bevölkerung beziehungsweise bestimmter touristischer Zielgruppen auf ein geschärftes Bewusstsein über Risiken durch Extremereignisse, die auch wetterabhängige touristische Aktivitäten künftig stärker (beziehungsweise häufiger) beeinträchtigen können, hingewirkt werden. Dazu und zur Steigerung der Anpassungsbereitschaft sowohl aufseiten der Zielgruppen als auch der Destinationsmanagementorganisationen kann außerdem der Ausbau von Mess-, Kontroll- und Frühwarnsystemen unter anderem für UV-Strahlungsbelastung, Aeroallergenkonzentrationen, Bakterienvorkommen in Gewässern oder Konvektionswetterlagen beitragen. Der Einsatz solcher Techniken stellt also nicht nur im Gesundheitsbereich, sondern auch aus tourismuswirtschaftlicher Perspektive eine wichtige Anpassungsmaßnahme dar.

Dem Städtetourismus unter Klimawandelbedingungen zuträglich sind all jene Maßnahmen, die zum Umgang mit einem veränderten Stadtklima beziehungsweise mit einem stärkeren Wärmeineffekt ergriffen werden (siehe Handlungsfeld „Bauwesen“), also die Beschattung, Begrünung und stärkere Einbindung blauer und grüner Infrastruktur zur Gestaltung öffentlicher Räume in Städten, die Verwendung von Baumaterialien mit niedrigen Albedo-Werten sowie Entsigelung. Für den Lufthygieniezustand und die thermischen Bedingungen in Städten spielen ferner die Sicherung von Kaltluftentstehungsgebieten und Luftleitbahnen im städtischen Umland sowie die stärkere Etablierung von Elektromobilität eine wichtige Rolle (Schmidt 2019).

Zur Anpassungskapazität im Tourismussektor tragen auch Klimawandel-sensitive Küsten- und Meeresschutzmaßnahmen bei (Naumann et al. 2014; Spiekermann und Franck 2014). Dazu zählen Wasserstandsvorhersagedienste, Renaturierungsmaßnahmen und Sedimentmanagement zum Umgang mit naturräumlichen Veränderungen an Küsten, die Errichtung multifunktionaler Deiche und teilweise die Deichrückverlegung. Außerdem können sich die Schaffung von Überschwemmungs- und Retentionsflächen, die Errichtung von Speicherbecken und der Erhalt beziehungsweise Neubau von Wasserrückhaltebecken und Schöpfwerken auch auf die Tourismuswirtschaft auswirken. Gleichzeitig haben solche Maßnahmen nicht ausnahmslos eine angebotssichernde Wirkung, sondern können teilweise auch mit Angebotseinschränkungen einhergehen. Auf ähnliche Weise kann die Anpassungsfähigkeit im Tourismussektor von Maßnahmen beeinflusst werden, die zur Anpassung in der Wald- und Forstwirtschaft ergriffen werden. Von Bedeutung sind hier unter anderem Waldumbauprozesse (Dümecke et al. 2013) zur Stärkung der Widerstandsfähigkeit gegenüber der Ausbreitung von Schädlingen und Krankheiten (siehe auch APA III: 3.4, Schaffung stabiler, strukturreicher und standortheimischer Wälder; APA III: 3.28, Flächenausbau für Baumarten- und Herkunftsversuche) und waldbrandvorbeugende Maßnahmen wie die Aufklärung der Bevölkerung oder der Ausbau des Waldbrandmonitorings. Der Klimawandelanpassung im Tourismussektor zuträglich sind außerdem Maßnahmen aus dem

Handlungsfeld Biologische Vielfalt, die dem Schutz intakter Ökosysteme und reizvoller Landschaften unter den Bedingungen des Klimawandels dienen. In dieser Hinsicht können von Instrumenten wie der Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit (in Gewässern und an Land) (APA III: 1.4 beziehungsweise 3.2), der Renaturierung von Fließgewässern und Auen (APA III: 1.1) sowie der Wiedervernässung von Hoch- und Niedermooren (APA III: 3.9) auch nützliche klimaanpassungsrelevante Effekte für den Tourismus ausgehen. Auch vom weiteren Bemühen um die nachhaltige und klimawandelberücksichtigende Ausgestaltung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen (APA III: 3.35) können dem Tourismus zugutekommen, da dies zum Erhalt (oder gar Ausbau) des Flächenanteils von Schutzgebieten in Deutschland geschieht. Zumindest für natur- und landschaftsfokussierte Tourismusformen stellt dies eine wichtige Grundlage dar.

3.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Aus dem Bereich Raumordnung gehen Beiträge zur Anpassungskapazität im Tourismussektor von der Steuerung der Landnutzungsformen im Rahmen der Regionalplanung und der konkreteren Regelung der Flächennutzung in der Bauleitplanung aus (Spiekermann und Franck 2014). Dabei werden in zunehmendem Maß auch Klimaanpassungserfordernisse berücksichtigt (BBSR 2016) – was auch den Umgang mit Klimaveränderungen in Tourismusdestinationen erleichtern sowie klimaangepasste Angebotserweiterungen oder Neuausrichtungen fördern kann. Als Beispiele sind hier der Hochwasserschutz an der Küste mithilfe von Deichbau und -erhöhung zu nennen sowie Hochwasserschutz in Flussgebieten wie die Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen und die Verbesserung des Wasserrückhalts in der Fläche. Solche Maßnahmen wirken sich auch auf den Tourismus in den betroffenen Regionen aus, also Küstentourismus beziehungsweise Wander- und Radtourismus entlang von Flüssen, und sind damit auch Teil des Anpassungsprozesses im Tourismus. Auch der Erhalt oder die Sicherung von Landschaft als einen wesentlichen touristischen Anziehungspunkt (Ahlhelm et al. 2020), beispielsweise Waldflächen, kann dem auf Klimaanpassung ausgerichteten Bestreben im Tourismussektor unter anderem zum Ausbau von Ganzjahresangeboten wie Wandern oder Nordic Walking zuträglich sein. Weiterhin können sich klimaanpassungsorientierte regionalplanerische Maßnahmen zur Kaltluftentstehung und Frischluftzufuhr für Verdichtungsgebiete oder Regelungen auf der Ebene der Bauleitplanung zur Begrünung von Fassaden und im öffentlichen Raum, auch unter Berücksichtigung der Allergenität bestimmter Pflanzen gleichzeitig als förderlich für den Städtetourismus und den Kur- und Gesundheitstourismus erweisen.

Mithilfe des Instruments zur Sicherung von Standorten mit herausragender touristischer Funktion (Ausweisung von Vorbehaltsgebieten), können solche Gemeinden oder Gemeindeteile gegenüber der Beeinträchtigung durch konkurrierende Nutzung gesichert werden und kann auf die Weiterentwicklung der vorhandenen touristischen Infrastruktur hingewirkt werden, vor allem, wenn deren bisheriges touristisches Angebot infolge des Klimawandels besonders betroffen ist (zum Beispiel Wintersportstandorte, Küstenstandorte). Außerdem kann mithilfe dieses Instruments auch die Entwicklung neuer Tourismusschwerpunkte befördert werden (Spiekermann und Franck 2014). In Küstengebieten kann dies die Entwicklung von Strandmanagementkonzepten beinhalten, mit deren Hilfe Sandverlusten an Badestränden entgegengewirkt werden soll. Unter die touristische Entwicklung im Rahmen dieses Instruments kann auch die Sicherung der Erreichbarkeit touristisch hoch bedeutsamer Standorte fallen, welche durch klimawandelassoziierte küstenmorphologische Veränderungen enorm erschwert ist. Dies trifft zum Beispiel auf die Ostfriesischen Inseln zu (Spiekermann und Franck 2014; Thomas 2017).

Ein Beitrag aus dem Finanzbereich zur Anpassungskapazität in der Tourismuswirtschaft könnte in der Erweiterung des bestehenden Versicherungsangebots bestehen. So könnten beispiels-

weise indexbasierte Rücktrittsversicherungen³⁰ sowohl (potenziell) Reisenden als auch touristischen Betrieben wie Beherbergungsbetrieben und Reiseveranstaltern dazu dienen, ökonomische Risiken in klimasensitiven Tourismusbereichen zu reduzieren.

Überdies kann der Bevölkerungsschutz zur Stärkung einer Komponente der Klimaanpassung im Tourismussektor beitragen – nämlich zur Reaktionsfähigkeit in Not- oder Katastrophensituationen infolge von Extremwetterereignissen (siehe oben). Die Berücksichtigung von Reisenden an Urlaubsorten in Krisenplänen sowie Eingriffe durch den Bevölkerungsschutz, wie Evakuierungen oder Bergungen nach extremen Niederschlägen oder Schneefällen oder bei Hochwasser, sind als Aktivitäten zu verstehen, die die Anpassungsfähigkeit der Tourismuswirtschaft stärken (siehe auch APA III: 5.5).

3.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 42: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“

Das Handlungsfeld enthält keine sehr dringenden Handlungserfordernisse.

		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		gering	gering	mittel	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Einschränkung touristischer Angebote: Auswirkungen fehlender Schneesicherheit	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	hoch	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Einschränkung touristischer Angebote: Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Verlagerung der Nachfrage	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		hoch		

³⁰ Versicherungen, bei denen die Auszahlung der Versicherungsprämie an bestimmte Schwellenwerte gekoppelt ist, wie beispielsweise das Über-/Unterschreiten eines bestimmten Pegelstands, das Unterschreiten einer bestimmten Schneemenge in einem bestimmten Zeitraum, das Überschreiten bestimmter Lufttemperaturwerte in einem bestimmten Zeitraum (Barnett und Mahul 2007; Cole et al. 2017).

Tabelle 43: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Tourismwirtschaft“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering-mittel	gering-mittel	gering	gering	sehr gering	ja
		mittel-hoch	gering-mittel			

Tabelle 44: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Tourismus“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung	
		optimistisch	pessimistisch		2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering-mittel

3.5 Quellenverzeichnis

- Abegg, B. (1996): Klimaänderung und Tourismus, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag AG an der ETH: Zürich.
- Abegg, B. (2012): Natürliche und technische Schneesicherheit in einer wärmeren Zukunft. *Forum für Wissen* 2012, S. 29–35.
- Abegg, B.; Agrawala, S.; Crick, F.; Montfalcon, A. de (2007): Climate change impacts and adaptation in winter tourism. *Adapting winter tourism and natural hazards management*. OECD, Paris. doi:10.1787/9789264031692-en.
- Abegg, B.; Steiger, R.; Walser, R. (2013): Herausforderung Klimawandel. Chancen und Risiken für den Tourismus in Graubünden. Amt für Wirtschaft und Tourismus (AWT); Bergbahnen Graubünden, Chur/Innsbruck.
- Ahlhelm, I.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Noky, B.; Simon, A.; Riegel, C.; Trum, A.; Altenburg, A.; Janssen, G.; Rubel, C. (2020): Praxishilfe – Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Ahlhorn, F.; Meyerdirks, J. (2017): Multifunktionale Räume für Küsten- und Naturschutz, Bremen.
- Aschenbrand, E. (2017): Die Landschaft des Tourismus. Eine sozialwissenschaftliche Studie zur Tourismuswirtschaft. Ein neuer Ansatz in der geographischen Tourismusforschung. Eine konstruktivistische Perspektive auf Tourismus. Springer VS, Wiesbaden.
- Balaš, M.; Strasdas, W. (2019): Nachhaltigkeit im Tourismus. Entwicklungen, Ansätze und Begriffsklärung. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Barnett, B. J.; Mahul, O. (2007): Weather Index Insurance for Agriculture and Rural Areas in Lower-Income Countries. *American Journal of Agricultural Economics* 89 (5), S. 1241–1247. doi:10.1111/J.1467-8276.2007.01091.X.
- Bausch, T.; Humpe; Gössling (2019): Does Climate Change Influence Guest Loyalty at Alpine Winter Destinations? *Sustainability* 11 (15), S. 1–22. doi:10.3390/su11154233.
- Bausch, T.; Ludwigs, R.; Meier, S. (2016): Wintertourismus im Klimawandel. Auswirkungen und Anpassungsstrategien. Hochschule für angewandte Wissenschaften München, München.
- Bausch, T.; Ludwigs, R.; Meier, S. (2017): Winter Tourism and Climate Change - Impacts and adaptation strategies. doi:10.13140/RG.2.2.31854.82249.
- Bausch, T.; Unseld, C. (2018): Winter tourism in Germany is much more than skiing! Consumer motives and implications to Alpine destination marketing. *Journal of Vacation Marketing* 24 (3), S. 203–217. doi:10.1177/1356766717691806.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie 2016, München.
- BayWG: Bayerisches Wassergesetz: Art. 35 Beschneiungsanlagen vom 23. Dezember 2019. Ursprünglich gefasst 25.02.2010.
- Becken, S.; Hay, J. E. (2011): *Tourism and climate change. Risks and opportunities*. Channel View Publications, Clevedon, UK, Buffalo.
- Berg, W. (2008): *Gesundheitstourismus und Wellnesstourismus*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- Bischof, M.; Schmude, J.; Bauer, M. (2017): Tourismus und Klimawandel – Eine nachfrageseitige Analyse zu Wahrnehmung und Reaktion am Beispiel der Alpen. *Zeitschrift für Tourismuswissenschaft* 9 (2), S. 221–247. doi:10.1515/tw-2017-0014.
- Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.) (2017): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-50397-3.

- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2019): Biotopverbund. Download unter <https://www.bfn.de/themen/biotop-und-landschaftsschutz/biotopverbund.html#c4927>. Stand: 28.09.2020.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016): Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region. Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen, Bonn.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2011): Innovativer Gesundheitstourismus in Deutschland. Branchenreport „Kurorte und Heilbäder“, Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2012): Wirtschaftsfaktor Tourismus Deutschland. Kennzahlen einer umsatzstarken Querschnittsbranche, Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2017a): Tourismuspolitischer Bericht der Bundesregierung. 18. Legislaturperiode, Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2017b): Wirtschaftsfaktor Tourismus in Deutschland. Kennzahlen einer umsatzstarken Querschnittsbranche. Ergebnisbericht.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.
- Cassens, M. (2013): Gesundheitstourismus und touristische Destinationsentwicklung. Ein Lehrbuch. Oldenbourg Verlag, München. doi:10.1524/9783486741889.
- Cole, S.; Giné, X.; Vickery, J. (2017): How Does Risk Management Influence Production Decisions? Evidence from a Field Experiment. *The Review of Financial Studies* 30 (6), S. 1935–1970. doi:10.1093/RFS/HHW080.
- Deutscher Heilbäderverband e.V. (DHV) (2018): Jahresbericht 2018, Berlin.
- Deutscher Tourismusverband e.V. (DTV); Deutscher Heilbäderverband e.V. (DHV) (2011): Begriffsbestimmungen – Qualitätsstandards für die Prädikatisierung von Kurorten, Erholungsorten und Heilbrunnen - 12. Auflage - April 2005. Aktualisiert gemäß: - Beschluss der Mitgliederversammlung vom 24. Oktober 2009 sowie - Beschluss der Mitgliederversammlung vom 10. Oktober 2010 sowie - Beschluss der Mitgliederversammlung vom 30. Oktober 2011.
- Deutscher Tourismusverband e.V. (DTV); Deutscher Heilbäderverband e.V. (DHV) (Hrsg.) (2017): Begriffsbestimmungen / Qualitätsstandards für Heilbäder und Kurorte, Luftkurorte, Erholungsorte - einschließlich der Prädikatisierungsvoraussetzungen - sowie für Heilbrunnen und Heilquellen.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (o.J.): Bioklima. Download unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/gesundheit/bioklima/bioklima_node.html. Stand: 06.05.2019.
- Dümecke, C.; Joschko, I.-L.; Wagner, K.; Kind, C. (2013): Handbuch zur guten Praxis der Anpassung an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Dworak, T.; Schmölder, A.; Günther, W.; Hoffmann, P.; Bausch, T.; Matauschek, C. (2020): Handlungsleitfaden. Anpassung an den Klimawandel: Die Zukunft im Tourismus gestalten. Umweltbundesamt (UBA).
- Endler, C.; Matzarakis, A. (2010): Schlussbericht zum Teilvorhaben „Klima- und Wetteranalyse“. Klimatrends in den Modellregionen Nordsee und Schwarzwald aus einer tourismus-klimatischen Sichtweise - Analyse hoch aufgelöster regionaler Klimasimulationen. Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 22, Freiburg.
- Endler, C.; Matzarakis, A. (2011): Climatic potential for tourism in the Black Forest, Germany - winter season. *Int J Biometeorol* 55 (3), S. 339–351. doi:10.1007/s00484-010-0342-0.
- Filies, C. (2012): Klimawandel an der deutschen Ostseeküste. Reaktion und Wahrnehmung touristischer Leistungsträger und Destinationen. *Coastline Web* (2/2012).

- Gonzalez, P. L. M.; Brayshaw, D. J.; Zappa, G. (2019): The contribution of North Atlantic atmospheric circulation shifts to future wind speed projections for wind power over Europe. *Clim Dyn* 53 (7-8), S. 4095–4113. doi:10.1007/s00382-019-04776-3.
- Gössling, S.; Peeters, P. (2015): Assessing tourism's global environmental impact 1900–2050. *Journal of Sustainable Tourism* 23 (5), S. 639–659. doi:10.1080/09669582.2015.1008500.
- Graw, K.; Grätz, A.; Matzarakis, A. (2019): Die Bioklimakarte von Deutschland: Zeitraum 1981 bis 2000. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 79 (7/8), S. 269–275.
- Grimm, B.; Lohmann, M.; Heinsohn, K.; Richter, C.; Metzler, D. (2009): Auswirkungen des demographischen Wandels auf den Tourismus und Schlussfolgerungen für die Tourismuspolitik. Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Kurzfassung. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Günther, W. (2013): Potenzielle Wirkungen auf Reiseverhalten und Nachfrage. NIT Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa GmbH. Download unter https://www.nit-kiel.de/wp-content/uploads/2020/07/2_NIT_Klimawandel_und_touristische_Nachfrage_Deckblatt.pdf. Stand: 16.04.2021.
- Hahne, U.; Kahl, C.; Kampen, S. von (2012): Tourismus in Nordhessen und regionale Betroffenheit durch den Klimawandel. *Tourismus in Nordhessen Band 1*. Universität Kassel.
- Haller, I.; Stybel, N.; Schumacher, S.; Mossbauer, M. (2011): Will Beaches be enough? Future Changes for Coastal Tourism at the German Baltic Sea. *Journal of Coastal Research* 61, S. 70–80. doi:10.2112/SI61-001.68.
- Heuchele, L.; Renner, C.; Syrbe, R.-U.; Lupp, G.; Konold, W. (2014): Nachhaltige Entwicklung von Tourismusregionen im Kontext von Klimawandel und biologischer Vielfalt. *Culterra* 64, Freiburg im Breisgau.
- Höppe, P.; Mackensen, S. von; Nowak, D.; Piel, E. (2002): Prävalenz von Wetterfühligkeit in Deutschland. *Deutsche medizinische Wochenschrift* (1946) 127 (1-2), S. 15–20. doi:10.1055/s-2002-19429.
- Karl, M.; Reintinger, C.; Schmude, J. (2015): Reject or select: Mapping destination choice. *Annals of Tourism Research* 54, S. 48–64. doi:10.1016/j.annals.2015.06.003.
- Kirstges, T. H. (2021): Tourismuskritik und Nachhaltigkeitsmanagement. In: A. Schulz, B. Eisenstein, M. A. Gardini, T. H. Kirstges, W. Berg (Hrsg) *Grundlagen des Tourismus*. S. 523–572. doi:10.1515/9783110641219-011.
- Kobernuß, J.; Schrahe, C. (2015): *Touristischer Handlungsleitfaden Klimawandel*. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.
- Koppe, C.; Jendritzky, G. (2005): Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure. *metz* 14 (2), S. 271–278. doi:10.1127/0941-2948/2005/0030.
- Kreilkamp, E.; Kirmair, L.; Kotzur, A. (2013): *Reisen auf den Spuren des Klimawandels. Leitfaden für touristische Destinationen am Beispiel der Regionen Lüneburger Heide und Harz*. Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg.
- Kropp, J.; Holsten, A.; Lissner, T.; Roithmeier, O.; Hattermann, F.; Huang, S.; Rock, J.; Wechsung, F.; Lüttger, A.; Pompe, S.; Kühn, I.; Costa, L.; Steinhäuser, M.; Walther, C.; Klaus, M.; Ritchie, S.; Metzger, M. (2009): *Klimawandel in Nordrhein-Westfalen. Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren*. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLUV), Potsdam.
- Łabuz, T. A. (2015): Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes. In: The BACC II Author Team (Hrsg) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 381–396. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_20.
- Lohmann, M. (2015): *Urlaubsreisetrends 2025. Zukunftstrends in der touristischen Nachfrage*. Kurzfassung zum Vortrag auf dem Tourismustag Rheinland-Pfalz „Zukunftswerkstatt Tourismus“; Bingen, 25. Nov. 2015. Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa GmbH (NIT), Kiel.

- Lühr, O.; Helfenbein, D.; Seefeldt, F.; Deutsch, M.; Tiessen, J.; Lucas, R.; Fekkak, M. (2011): Evaluierung möglicher Anpassungsmaßnahmen in den Sektoren Energie, Industrie, Mittelstand und Tourismus vor dem Hintergrund der Erarbeitung eines „Aktionsplans Anpassung“ der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Düsseldorf, Berlin, Wuppertal.
- Matzarakis, A. (2006): Weather- and climate-related information for tourism. *Tourism and Hospitality Planning & Development* 3 (2), S. 99–115. doi:10.1080/14790530600938279.
- Matzarakis, A.; Lohmann, M. (2017): Tourismus. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöllner (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 235–241.
- Matzarakis, A.; Tinz, B. (2014): Tourismus an der Küste sowie in Mittel- und Hochgebirge: Gewinner und Verlierer. In: J. L. Lozán, H. Graßl, L. Karbe, G. Jendritzky (Hrsg) *Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen*. Hamburg. S. 1–9.
- Mayer, M.; Steiger, R. (2013): Skitourismus in den Bayerischen Alpen - Entwicklung und Zukunftsperspektiven. *Arbeitsberichte der ARL 9*, Hannover.
- Meinke, I.; Reckermann, M. (2012): *Ostseeküste im Klimawandel. Ein Handbuch zum Forschungsstand*. Norddeutsches Klimabüro; BALTEX; Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG); Zentrum für Material- und Küstenforschung, Geesthacht.
- Naumann, S.; Kaphengst, T.; McFarland, K.; Stadler, J. (2014): *Naturbasierte Ansätze für Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel*. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.
- Oppenheimer, M.; Glavovic, B.; Hinkel, J.; van de Wal, R.; Maignan, A. K.; Abd-Elgawad, A.; Cai, R.; Cifuentes-Jara, M.; DeConto, R. M.; Ghosh, T.; Hay, J.; Isla, F.; Marzeion, B.; Meyssignac, B.; Sebesvari, Z. (2019): Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In: H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (Hrsg) *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Pilotto, L. S.; Douglas, R. M.; Burch, M. D.; Cameron, S.; Beers, M.; Rouch, G. J.; Robinson, P.; Kirk, M.; Cowie, C. T.; Hardiman, S.; Moore, C.; Attewell, R. G. (1997): Health effects of exposure to cyanobacteria (blue-green algae) during recreational water-related activities. *Australian and New Zealand Journal of Public Health* 21 (6), S. 562–566. doi:10.1111/j.1467-842X.1997.tb01755.x.
- Pinto, J. G.; Reyers, M. (2017): Winde und Zyklonen. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöllner (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 67–75.
- Quack, H.-D.; Wöfle, F. (2018): Aktiv- und Gesundheitstourismus: Begriffe – Motivlagen – Ausprägungen. In: P. Heise, M. Axt-Gadermann (Hrsg) *Sport- und Gesundheitstourismus 2030. Wie die „Generation plus“ den Markt verändert*. Wiesbaden. S. 155–177. doi:10.1007/978-3-658-16076-0_10.
- Reinhardt, U. (2019): *Tourismusanalyse 2019*. Stiftung für Zukunftsfragen.
- Schmidt, E. (2019): *Tourismus und Klimawandel im deutschsprachigen Mitteleuropa. Eine Status-quo-Analyse des Tourismussektors bezüglich Maßnahmen im Bereich Klimaanpassung und Klimaschutz auf Bundesland-/Kantonebene*. Masterarbeit.
- Schmidt, P.; Steiger, R.; Matzarakis, A. (2012): Artificial snowmaking possibilities and climate change based on regional climate modeling in the Southern Black Forest. *metz* 21 (2), S. 167–172. doi:10.1127/0941-2948/2012/0281.
- Schwirplies, C.; Ziegler, A. (2017): Adaptation of future travel habits to climate change. *Tourism Economics* 23 (6), S. 1275–1295. doi:10.1177/1354816616683053.
- Scott, D.; Freitas, C. de; Matzarakis, A. (2009): Adaptation in the Tourism and Recreation Sector Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change. S. 171–194.
- Sonnenschein, M. (2009): *Medical Wellness & Co.: Der Gesundheitsvorsorgetourismus in Deutschland. Angebot und Nachfrage im Wandel*. Dissertation, Mainz.

- Sonntag, U.; Lohmann, M. (2019): ReiseAnalyse 2019. Erste ausgewählte Ergebnisse der 49. Reiseanalyse zur ITB 2019. Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen e.V. (FUR), Kiel.
- Spiekermann, J.; Franck, E. (2014): Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung. Handlungsempfehlungen für die niedersächsische Planungspraxis auf Landes- und Regionalebene. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.
- Splitter, R. (2001): Anforderungen eines landschaftsorientierten Tourismus an die Landwirtschaft in Westfalen. In: K. Ditt, R. Gudermann, N. Rüße (Hrsg) Agrarmodernisierung und ökologische Folgen. Westfalen vom 18. bis zum 20. Jahrhundert. Forschungen zur Regionalgeschichte. – 40. Paderborn. S. 627–655.
- Staiger, H.; Laschewski, G.; Grätz, A. (2012): The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int J Biometeorol* 56 (1), S. 165–176. doi:10.1007/s00484-011-0409-6.
- Staiger, H.; Laschewski, G.; Matzarakis, A. (2018): A short note on the inclusion of sultriness issues in perceived temperature in mild climates. *Theor Appl Climatol* 131 (1-2), S. 819–826. doi:10.1007/s00704-016-2013-5.
- Statista (Hrsg.) (2019): Reiseverhalten der Deutschen. Download unter <https://de.statista.com/statistik/studie/id/13611/dokument/reiseverhalten-der-deutschen--statista-dossier/>.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019): Übernachtungen in Beherbergungsbetrieben nach Gemeindegruppen. Download unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Gastgewerbe-Tourismus/Tabellen/uebernachtungen-gemeindegruppen.html>. Stand: 10.05.2019.
- Strasdas, W.; Zeppenfeld, R. (Hrsg.) (2016): Tourismus und Klimawandel in Mitteleuropa. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-14707-5.
- Streitberger, M.; Ackermann, W.; Fartmann, T.; Kriegel, G.; Ruff, A.; Balzer, S.; Nehring, S. (2016): Artenschutz unter Klimawandel: Perspektiven für ein zukunftsfähiges Handlungskonzept. Ergebnisse des F+E-Vorhabens (FKZ 3513 86 0800). Naturschutz und biologische Vielfalt 147. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.
- The BACC II Author Team (Hrsg.) (2015): Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. doi:10.1007/978-3-319-16006-1.
- Thomas, D. S. K.; Wilhelmi, O. V.; Finnessey, T. N.; Deheza, V. (2013): A comprehensive framework for tourism and recreation drought vulnerability reduction. *Environ. Res. Commun.* 8 (4), S. 44004.
- Thomas, K. (2017): Strategien zur Klimawandelanpassung im Tourismussektor. Eine Untersuchung touristisch geprägter Regionen an der deutschen Nord- und Ostseeküste. Masterarbeit, Eberswalde.
- Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) (Hrsg.) (2019): Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen - IMPAKT II, Erfurt.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2018): Handlungsfeld Tourismus. Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeld-tourismus#textpart-1>. Stand: 28.03.2019.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.
- Willms, J. (2007): Climate Change = Tourism Change? Likely impacts of climate change on tourism in Germany's North Sea Coast Destinations. In: A. Matzarakis (Hrsg) Developments in tourism climatology. 3rd International

Workshop on Climate, Tourism and Recreation ; Alexandroupolis, Greece 19 - 22 September 2007. Freiburg. S. 246–253.

Witting, M.; Schmude, J. (2019): Impacts of climate and demographic change on future skier demand and its economic consequences – Evidence from a ski resort in the German Alps. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* 26, S. 50–60. doi:10.1016/j.jort.2019.03.002.

Wölfle, F.; Schnorbus, L.; Klein, A.; Wittmann-Wurzer, A.; Neumann, P.; Zur Oven-Krockhaus, I. (2018): Winter-tourismus in deutschen Mittelgebirgen und Mittelgebirgslagen im Kontext des Klimawandels. *Zeitschrift für Tourismuswissenschaft* 10 (2), S. 303–317. doi:10.1515/tw-2018-0018.

World Tourism Organization (UNWTO) (o.J.): Glossary of tourism terms.

World Tourism Organization (UNWTO) (Hrsg.) (2010): *International Recommendations for Tourism Statistics 2008*. World Tourism Organization (UNWTO).

Zirkel, A. (2013): *Auswirkungen des Klimawandels auf den Gesundheitstourismus in Deutschland. am Beispiel der heilklimatischen Kurorte im Schwarzwald*. Masterarbeit, Eberswalde.

4 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

Autoren: Mareike Wolf, Can Ölmez, Konstanze Schönthaler | Bosch & Partner, München
Luise Porst, Walter Kahlenborn, Leonie Dudda | adelphi, Berlin

4.1 Ausgangslage

4.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Wetter, Witterung und Klima können das menschliche Wohlbefinden und die menschliche Gesundheit beeinträchtigen. Sie können sich sowohl auf den Körper als auch auf die Psyche auswirken (Bunz 2016; Bunz und Mücke 2017). In diesem Handlungsfeld werden zwei betroffene Systeme betrachtet: zum einen die betroffenen Menschen selbst und zum anderen das Gesundheitssystem, dazu gehören Ärzte, Krankenhäuser, Rettungsdienste und Krankenkassen. Die Bevölkerung steht dabei im Zentrum der meisten hier behandelten Klimawirkungen. Jedoch haben gesundheitliche Auswirkungen auf die Bevölkerung immer auch Folgen für das Gesundheitssystem. Deshalb steht das Kapitel zum Gesundheitssystem den Wirkpfaden folgend am Ende dieses Handlungsfeldes, es ist deshalb aber nicht weniger wichtig.

Menschen können direkt und indirekt von Wetter und Witterung beeinträchtigt sein (Augustin et al. 2017). Extremereignisse wie Hitze, Starkwinde oder Starkniederschläge können Körper und Psyche direkt belasten, beispielsweise indem sie zu Beschwerden, schweren Erkrankungen, Verletzungen oder zum Tod führen. Auf vielfältige Weise beeinflussen Wetter und Witterung auch die UV-Strahlung, welche Haut und Augen schädigen kann und Hauptursache von Hautkrebs sein kann. Wenn Krankheitserreger, deren Überträger oder auch allergieverursachende Pflanzen oder Tiere von Wetter oder Witterung profitieren oder die Wirkungen von Schadstoffen und Strahlung verstärkt werden, wird von indirekten Folgen für den Menschen gesprochen (Mücke und Matzarakis 2018).

Insbesondere die steigenden Temperaturen spielen als klimatischer Einfluss eine wesentliche Rolle für die Gesundheit der Menschen. Hitze belastet das Herz-Kreislaufsystem und kann zu aggressivem Verhalten führen. Es gibt Untersuchungen, die belegen, dass selbst die Suizid-Rate mit zunehmenden Temperaturen ansteigt (Pervilhac et al. 2019). Sonnenreiche, hohe Temperaturen begünstigende Jahre gehen zudem mit einer hohen UV-Strahlungsbelastung einher, was das Risiko UV-bedingter Gesundheitsschäden erhöht. Die UV-Strahlung befördert zudem chemische Prozesse in der Atmosphäre, die die Luftschadstoffbelastung erhöhen (beispielsweise durch bodennahes Ozon; Mücke und Matzarakis 2018). Hohe Lufttemperaturen und starke Sonneneinstrahlung erwärmen Flüsse, Seen und Meere und befördern das Wachstum von gesundheitsgefährdenden Mikroorganismen im Wasser. Außerdem kann der graduelle Temperaturanstieg krankheitsverursachende oder allergene Pflanzen und Tiere begünstigen (Mücke und Matzarakis 2018).

Jeder Mensch kann von wetter-, witterungs- und klimabeeinflussten Krankheiten betroffen sein (Mücke und Matzarakis 2018). Dennoch gibt es Bevölkerungsgruppen, die sensitiver gegenüber den gesundheitlichen Folgen des Klimawandels sind (Bunz und Mücke 2017; Mücke und Matzarakis 2018). Dies sind insbesondere aufgrund des Alters oder von Vorerkrankungen (immun-)geschwächte Personen. Darüber hinaus gibt es Bevölkerungsgruppen, die gesundheitsgefährdenden Situationen länger und häufiger ausgesetzt sind als andere, beispielsweise Personen, die sich viel im Freien aufhalten.

Die beschriebenen Klimawirkungen verursachen nicht nur individuelle Betroffenheiten, sie haben auch bedeutende Auswirkungen auf das Gesundheitssystem und seine Akteurinnen und Akteure und damit eine organisatorische und eine volkswirtschaftliche Komponente. Dies spiegelt sich auch in den Querverbindungen zu anderen Handlungsfeldern wider. Die körperliche und psychische Belastung von Menschen ist nicht nur für das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ von Relevanz. Sie schränkt auch die Leistungsfähigkeit der betroffenen Personen ein. Lässt die Leistungsfähigkeit Berufstätiger nach, ist dies auch für die Handlungsfelder „Industrie und Gewerbe“ sowie „Bauwesen“ von Bedeutung.

4.1.2 Neuere Entwicklungen

Der Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel zeigt, dass die Anzahl der heißen Tage pro Jahr bereits zugenommen hat (Indikator GE-I-1 in UBA 2019b). Auch der graduelle Temperaturanstieg ist messbar (UBA 2019b). Der Klimawandel verursacht damit schon jetzt gesundheitliche Probleme. Das Bewusstsein der Bevölkerung hierfür hat in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen. Konzepte wie ‚Planetary Health‘ (Gabrysch 2018; Müller et al. 2018) und Publikationen wie der Lancet Countdown (Castres 2017; Rossinot 2018; Watts et al. 2018) stehen für dieses zunehmende Bewusstsein für die Bedeutung des Umwelt- und Klimazustands für die menschliche Gesundheit.

In Deutschland hat die aktuelle Debatte um den Klimawandel dazu geführt, dass immer mehr Menschen, die in Gesundheitsberufen arbeiten, auf die Bedeutung des Klimawandels für die menschliche Gesundheit hinweisen und an der öffentlichen Diskussion zu Wirkungen und Maßnahmen teilnehmen. So hat sich im Jahr 2017 die „Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit“ (KLUG) gegründet, „ein Bündnis von Organisationen und Einzelpersonen aus dem Gesundheitsbereich, dessen Ziel es ist, den Klimawandel als wichtiges Gesundheitsthema zu etablieren und politische und gesellschaftliche Veränderungen anzustoßen, um dieser Gefahr effektiv zu begegnen“ (KLUG 2019). Im Mai 2019 nannte der Marburger Bund, der größte deutsche Ärzteverband, auf seiner Hauptversammlung den Klimawandel die größte Gefahr für die globale Gesundheit und forderte, dass der Klimawandel und seine Folgen für die menschliche Gesundheit Priorität im gesundheitspolitischen Handeln bekommen (Marburger Bund 2019).

Vor dem Hintergrund der älter und damit sensibler werdenden Gesellschaft in Deutschland ist das zunehmende Bewusstsein für die gesundheitliche Relevanz von Wetter, Witterung und Klima eine wichtige Voraussetzung für individuelle Anpassungs- und Vorsorgemaßnahmen.

4.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Der besonderen Bedeutung des Handlungsfelds „Menschliche Gesundheit“ angemessen wurden vergleichsweise viele Klimawirkungen für die Bearbeitung ausgewählt (Tabelle 45). Aus nahezu allen Themenfeldern der Klimawirkungsketten zum Handlungsfeld (UBA 2016) wurden Klimawirkungen bearbeitet. Ausnahme ist das Themenfeld „Gesundheitsinfrastruktur“, für dessen Klimawirkungen im Auswahlprozess im Vergleich weder ausreichend Relevanz noch ausreichend Wissenszuwachs gesehen wurde, um sie für eine Bearbeitung auszuwählen. Dafür wurde mit der Klimawirkung „Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“ eine Klimawirkung definiert, die nicht in den Wirkungsketten steht.

Hitzebelastung ist eine Klimawirkung, die in Hitze-extremen Jahren zu Tausenden zusätzlichen Todesfällen führen kann. Sie ist daher von besonderer Wichtigkeit und wurde dementsprechend auch intensiv bearbeitet. Die Folgen des Klimawandels für Pollenallergien werden am Beispiel der Erle abgebildet. Wie der Klimawandel gesundheitsgefährdende Mikroorganismen beeinflusst, wird für die Vibrionen in der Ostsee aufgezeigt (Tabelle 45).

Extensiv erarbeitet wurden die Folgen des Klimawandels für die Verbreitung und Abundanz von Vektoren, die Belastung mit Luftschadstoffen und für UV-bedingte Gesundheitsschädigungen. Diese Klimawirkungen zeigen die Breite des Handlungsfeldes. Die Klimawirkung „Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen“ zeigt, dass neben Hitze auch andere Wetterextreme zu physischen und psychischen Beeinträchtigungen führen können (Mücke und Matzarakis 2018).

Ursprünglich sollten auch die Klimawirkungen „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen“ und „Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren“ intensiv bearbeitet werden. Im Zuge der Spezifizierung wurde aber deutlich, dass dies nicht möglich oder nicht sinnvoll ist. Noch sind nicht alle Wirkzusammenhänge hinreichend gut verstanden, um sie sachgerecht quantitativ in die Zukunft projizieren zu können. So kann die Entwicklung der UV-Belastung beispielsweise aktuell nur mit großer Unsicherheit behaftet modelliert werden. Die Operationalisierung der Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren wurde für eine Reihe von Vektoren und Wirtstieren geprüft (Schildzecken, Stechmücken und Rötelmäuse). Dass diese Klimawirkung letztendlich doch extensiv bearbeitet wurde, liegt darin begründet, dass die gegenwärtig bedeutendste Schildzeckenart *Ixodes ricinus* (Gemeiner Holzbock) in Deutschland bereits flächendeckend verbreitet ist und zu den anderen bedeutenden Schildzeckenarten die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verbreitung und Abundanz noch nicht hinreichend genau beschrieben werden können. Für die Verbreitung von bisher in Deutschland auftretenden, nicht heimischen Stechmückenarten ist das Klima bisher nicht der entscheidende Faktor. Für die Rötelmaus, einem wichtigen Reserviertier aus der Ordnung der Nagetiere, konnte über die Nahrungsverfügbarkeit eine Klimaabhängigkeit der Populationsdichte aufgezeigt werden. Es ist jedoch fraglich, ob die Population klimabedingt auch künftig noch deutlich wachsen kann. Auch wenn die Fallzahlen von humanen Hantavirusinfektionen, die hauptsächlich von Rötelmäusen übertragen werden, wellenförmig ansteigen, wurde daher entschieden, die Rötelmauspopulation nicht in den Fokus einer intensiv bearbeiteten Klimawirkung zu stellen. Die Umwidmung der Klimawirkung folgte dementsprechend, wie die Auswahl der Klimawirkungen insgesamt, einer Zusammenschau von Bedeutung und Wissensstand.

Tabelle 45: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

Für Klimawirkungen, die für intensive Bearbeitung ausgewählt wurden, ist die Spezifizierung skizziert.

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Hitzebelastung	Hitzebelastung von älteren, alleinstehenden Personen
Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft (zum Beispiel Pollen)	Blühbeginn der Erle
Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen	Beginn der gesundheitlich relevanten Aktivität von <i>Vibrio vulnificus</i> in der Ostsee
UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)	Extensive Bearbeitung
Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren	Extensive Bearbeitung
Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)	Extensive Bearbeitung
Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen	Extensive Bearbeitung

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Auswirkungen auf das Gesundheitssystem ³¹	Extensive Bearbeitung
Kältestress (zum Beispiel Kältetote, Erfrierungen, Leistungsfähigkeit)	Nicht ausgewählt
Verbreitung vektorassoziierter Krankheitserreger	Nicht ausgewählt
Allergische Reaktionen durch Aeroallergene tierischer Herkunft (zum Beispiel Brennhaare)	Nicht ausgewählt
Verschlechterung von Innenraumklima und -hygiene (zum Beispiel Mykotoxine)	Nicht ausgewählt Aspekte dieser Klimawirkung werden aber im Handlungsfeld „Bauwesen“ beschrieben.
Gesundheitliche Auswirkungen infolge verschlechterter Trinkwasserqualität	Nicht ausgewählt Die Beschreibung der Klimawirkung „Trinkwasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ umfasst Aspekte der Trinkwasserqualität und -verfügbarkeit.
Magen-Darm-Erkrankungen infolge von Lebensmittelverunreinigungen	Nicht ausgewählt
Hoher Krankenstand / Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte	Nicht ausgewählt Es wurde aber eine ähnliche Klimawirkung definiert und bearbeitet, die im Folgenden unter dem Titel „Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“ beschrieben ist.
Belastung von Überwachungssystemen, Labordiagnostik	Nicht ausgewählt
Schäden und Zerstörung an Gesundheitsinfrastruktur	Nicht ausgewählt
Verringerte Zahl von Verkehrsunfällen infolge von Schnee- und Glatteisbedingungen	Nicht ausgewählt

³¹ Im Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ ist keine Institution vertreten, die auf diesem Gebiet federführend ist (etwa kassenärztliche Vereinigung oder Versorgungsforschung).

4.2 Klimawirkungen im Detail

4.2.1 Hitzebelastung

Hintergrund und Stand der Forschung

Hitzebelastung entsteht vor allem bei Strahlungswetterlagen mit hohen Lufttemperaturen und gleichzeitiger Windstille oder sehr schwachen Winden (Graw et al. 2019). Bleibt dieser Zustand über mehrere Tage bestehen, wird von einer Hitzeperiode gesprochen. Die Folgen der Hitze-Sommer seit dem Jahrtausendwechsel zeigen, dass Hitzewellen insbesondere für Menschen mit Vorerkrankungen und sensitive Bevölkerungsgruppen ein bedeutendes Gesundheitsrisiko und für die Gesellschaft eine große Herausforderung darstellen (Krug und Mücke 2018; Muthers und Matzarakis 2018). Im Sommer 2003 starben europaweit geschätzt 70.000 Personen infolge der Hitze (Robine et al. 2008). In Deutschland waren es nach Schätzungen von an der Heiden et al. (2019b) 7.600 Menschen im Jahr 2003 sowie 6.200 Menschen im Jahr 2006 und 6.100 Menschen im Jahr 2015. an der Heiden et al. (2019b) betrachteten dabei die 15. bis 40. Kalenderwoche (etwa April bis September) und bewerteten ihre Schätzungen als eher konservativ. Höher sind beispielsweise die Schätzungen von Robine et al. (2008), die für Deutschland von 9.355 hitzebedingten Todesfällen im Juni bis September 2003 ausgehen. Eine bundesweite Zeitreihe der hitzebedingten Todesfälle ist als Indikator GE-I-2 im Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel enthalten (UBA 2019b).

Die seit 2007 existierenden regionalen Monitoringsysteme zum Mortalitätsgeschehen in Berlin und Hessen zeigen, dass der Sommer 2018 ähnlich verheerend war wie der Sommer 2003. In Hessen wurden im Jahr 2018 nach Schätzungen mit 740 hitzebedingten Sterbefällen ähnlich hohe Zahlen erreicht wie im Jahr 2003 (an der Heiden et al. 2019a). Damals starben in Hessen geschätzt rund 780 Personen hitzebedingt (an der Heiden et al. 2019a), Uphoff und Hauri (2005) gehen sogar von etwa 1.000 zusätzlichen Todesfällen aus. In Berlin führte der Sommer 2018 nach Analyse von an der Heiden et al. (2019a) mit geschätzt 490 Sterbefällen zu einer höheren Anzahl hitzebedingter Sterbefälle als 2003, aber zu ähnlichen Werten wie im Jahr 2010. Beide Bundesländer weisen nach diesen Schätzungen eine hitzebedingte Mortalität von etwa zwölf Todesfällen pro 100.000 Einwohnerinnen und Einwohnern auf (an der Heiden et al. 2019a). Der Blick auf besonders betroffene Altersgruppen im Jahr 2018 zeigt, dass die Anzahl Todesfälle mit steigendem Alter wahrscheinlich zunimmt. So wurde für die Altersgruppe 75 bis 84 Jahre eine hitzebedingte Mortalität von 53/100.000 in Hessen und 67/100.000 in Berlin geschätzt (an der Heiden et al. 2019a). Für die Altersgruppe 85+ wurde eine Mortalität von 260/100.000 in Hessen und 320/100.000 in Berlin angenommen (an der Heiden et al. 2019a). Auch die Studie von Scherer et al. (2013), die die hitzebedingte Mortalität in Berlin auf Basis der Daten von 2001 bis 2010 analysiert haben, bestätigt, dass ältere Personen (hier: ab 65 Jahren) deutlich häufiger betroffen sind als jüngere. Davon abgesehen, aber kommen die Autorinnen und Autoren dieser Studie zu deutlich höheren Mortalitätszahlen. Ihren Schätzungen zufolge sind in Berlin³² im Durchschnitt rund 1.600 Todesfälle im Jahr auf Hitze zurückzuführen, das sind fünf Prozent aller Todesfälle (Scherer et al. 2013). Für das Jahr 2010 gehen Scherer et al. (2013) von 1.832 ± 328 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen in Berlin aus. Darüber hinaus wird in der Studie betont, dass es nicht nur in den extrem warmen Jahren zu hitzebedingten Todesfällen kommt. Für den Sommer 2004, der in der Gesamtschau bezüglich Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer weitgehend normal war (Bissolli und Müller-Westermeier 2005), errechneten Scherer et al. (2013) 695 ± 147 hitzebedingte Todesfälle.

³² Zahlen zur Zunahme der hitzebedingten Exzessmortalität für verschiedene deutsche Städte unter Annahme verschiedener Temperaturszenarien haben Huber et al. (2020) veröffentlicht.

Verbunden mit dem Klimawandel steigen die Temperaturen und die Häufigkeit, Dauer und Intensität von Hitzeperioden nimmt weiter zu. Schon in den letzten Jahren kam es gehäuft zu Hitzeextremen: Acht der elf wärmsten Jahre seit Beginn der Wetteraufzeichnungen in Deutschland im Jahr 1881 lagen im Zeitraum zwischen den Jahren 2000 und 2018 (UBA 2019b). Klimaprojektionen für Mitteleuropa, basierend auf dem IPCC-Treibhausgaszenario A1B, lassen vermuten, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit von Hitzeperioden bis zum Ende des Jahrhunderts um mehr als das Doppelte erhöht sein könnte und die Hitzeperioden um 30 Prozent länger andauern könnten (Zacharias und Koppe 2015; Kuttler 2018). Aktuelle Projektionen für Deutschland zeigen die Abbildung 14 und Abbildung 15.

Die zu erwartenden Klimaänderungen führen zu einer Verschärfung der Hitzebelastung (Kendrovski et al. 2017), und eine projizierte Alterung der europäischen Bevölkerung lässt die Verschlimmerung von Krankheitssymptomen bei anfälligen und geschwächten Personen erwarten (Zacharias und Koppe 2015). Hübler et al. (2008) schätzten daher, einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Wärmebelastung und Mortalität annehmend und den demographischen Wandel berücksichtigend³³, dass die Anzahl der hitzebedingten Todesfälle im Jahr am Ende des Jahrhunderts (1971 bis 2100) um 8.500 Fälle höher sein könnte als in der Referenzperiode der Studie (1971 bis 2000). Sie gehen davon aus, dass die Gesamtzahl der hitzebedingten Todesfälle in Deutschland dann in der Größenordnung von 10.000 bis 20.000 Menschen pro Jahr liegen könnte (sich also mehr als verdreifachen könnte; Hübler et al. 2008; Hübler 2014).

Die gesundheitlichen Folgen von Hitze gelten als gut belegt. Zacharias und Koppe (2015) nennen Herz- und Gefäßerkrankungen, Atemwegserkrankungen, rheumatische Beschwerden sowie Kopfschmerzen und Migräne. Hitzebelastung kann zum Tod führen, vor allem wenn sie länger als drei Tage andauert (Krug und Mücke 2018). Neben diesen physischen Folgen ist ein Zusammenhang zwischen thermischer Belastung und psychischen Krankheiten mit direkten und indirekten Folgen für die Betroffenen belegt (Zacharias und Koppe 2015; Bunz 2016). So steigt beispielsweise während einer Hitzewelle die Zahl der Krankenhauseinweisungen aufgrund von psychischen Leiden an (Nitschke et al. 2007). Auch geht die physische und kognitive Leistungsfähigkeit zurück (Bunz 2016).

Sofern gesunde Menschen im Falle einer Hitzebelastung ihrem Körper ausreichend Flüssigkeit zuführen und größere körperliche Aktivitäten vermeiden, stellen Hitzewellen keine große Gefahr dar (Muthers und Matzarakis 2018). Allerdings lassen sich Bevölkerungsgruppen identifizieren, für die aufgrund intrinsischer und extrinsischer Faktoren Hitzewellen eine besondere Gefahr darstellen (Capellaro und Sturm 2015a; Kuttler 2018). Im Fall der intrinsischen Betroffenheit ist die Thermoregulation des Organismus eingeschränkt, sodass die Gefahr eines Lungenversagens oder eines Herzinfarkts signifikant erhöht ist. Die größte Betroffenheit lässt sich – unter anderem aufgrund einer reduzierten Schweißproduktion (Health Canada 2011; Berry et al. 2014) – bei älteren Menschen (ab 60 Jahren) und bei Kleinkindern beobachten (Vicedo-Cabrera et al. 2016; Ragetti et al. 2017). Außerdem lässt sich eine gender- beziehungsweise geschlechtsspezifische Betroffenheit nachweisen, die in verschiedenen Altersklassen unterschiedlich ist. Die hier genannten Altersklassen sind Näherungswerte, in der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben. Männer gelten im Alter zwischen 35 und circa 60 Jahren als stärker von Hitzebelastung betroffen als Frauen (Borrell et al. 2006; Fouillet et al. 2006). Begründet wird dies unter anderem damit, dass sie häufiger besonders belasteten Berufsgruppen angehören. Die Sterblichkeit von Frauen verglichen mit der von Männern nimmt aber ab einem Alter von rund

³³ Nicht berücksichtigt wird eine Anpassung an den Klimawandel, weder durch natürliche Akklimatisierung noch durch technische Maßnahmen. Ebenso wenig werden Effekte durch vorgezogene Sterblichkeit berücksichtigt. Unter „vorgezogene Sterblichkeit“ wird hier der Effekt verstanden, dass sich an die erhöhte Sterblichkeit nach Hitzeereignissen oft eine Zeitspanne anschließt, in der die Mortalität unter das allgemeine Grundniveau fällt (Eis et al. 2010). Eis et al. (2010) bewerten die Schätzung von Hübler et al. (2008) deswegen als eher konservativ.

50 Jahren stetig zu (Gabriel 2009). In der Altersklasse ab 75 Jahren ist die Sterblichkeit von Frauen deutlich höher als die von Männern. Als Ursachen werden vor allem soziale Faktoren genannt (siehe unten extrinsische Faktoren). Frauen sind mit steigendem Alter – auch aufgrund der höheren Lebenserwartung – häufiger von sozialer Isolation und von Armut betroffen (NCCEH 2010). Altersunabhängig gibt es zudem physiologische Unterschiede. So weisen Frauen aufgrund eines niedrigeren thermischen Optimums eine höhere Hitzesensitivität auf als Männer (Gabriel 2009; Zacharias und Koppe 2015).

Zu den ebenfalls intrinsisch Betroffenen zählen chronisch Kranke und Menschen mit einer psychischen Vorbelastung. Bei ihnen wird eine reduzierte Thermoregulation aufgrund von chronischen Herz-Kreislauf- und Lungenerkrankungen sowie Medikamentengebrauch beobachtet (Bunz 2016). Zacharias und Koppe (2015) weisen beispielsweise auf eine Untersuchung hin, die besagt, dass sich das Mortalitätsrisiko aufgrund von Erkrankungen der Herzkranzgefäße während Hitzewellen um 10 Prozent erhöht. Neue Studien zeigen zudem einen Zusammenhang zwischen Hitzebelastung im fortgeschrittenen Schwangerschaftszyklus und der Zahl an Totgeburten (Vicedo-Cabrera et al. 2016).

Zu den extrinsischen Faktoren zählen unter anderem ein geringes Einkommen, der Beziehungsstatus, die soziale, sprachliche und kulturelle Integration, die Wohnsituation sowie die Wetter- und Umweltexposition (NCCEH 2010; Health Canada 2011; Berry et al. 2014; Mayrhuber et al. 2018). Rooney et al. (1998) begründen damit zusammenhängend die höheren Mortalitätsraten in London im Vergleich zum Rest des Vereinigten Königreiches nach der Hitzewelle 1995. Zwar war die Bevölkerung in London jünger als die im Rest des Landes, doch war dort zugleich der Anteil der ethnischen Minderheiten, Arbeitslosen und alleinstehenden Personen am höchsten, welche häufig in Sozialbauwohnungen mit keiner oder einer schlechten technischen Gebäudeausstattung lebten (Rooney et al. 1998). Die Bedeutung der sozialen Teilhabe für Ausmaß und Auswirkungen von Hitzebelastung wurde auch für Paris im Zeitraum 2004 bis 2009 beobachtet (Benmarhnia et al. 2017). In einer Wiener Pilotstudie von Wiesböck et al. (2016) zur Hitzebelastung ethnischer Minderheiten ließ sich die stärkere Betroffenheit im Vergleich zu Menschen ohne Migrationshintergrund auf drei Faktoren zurückführen: Der häufig niedrigere Bildungs- und Alphabetisierungsgrad der beobachteten Bevölkerungsgruppe geht mit einem geringeren Einkommen, einem ungesunderen Lebensstil und der Arbeit in atypischen Beschäftigungsverhältnissen mit hoher physischer Belastung einher (Wiesböck et al. 2016). Diese Faktoren führen zu einer erhöhten Sensitivität (Bunz 2016; Wiesböck et al. 2016) und einer geringeren Möglichkeit, Anpassungsmaßnahmen umzusetzen (beispielsweise Anschaffung von Klimaanlage, Umstellung der Ernährung, Wechsel des Arbeitsplatzes).

Hitzebelastung wirkt abhängig vom zeitlichen und räumlichen Auftreten der Hitze. Eine in den frühen Sommermonaten auftretende Hitzewelle stellt aufgrund geringer Akklimatisation an sommerliche Temperaturen ein größeres Risiko dar als eine spätsommerliche Hitzewelle (Health Canada 2011; Muthers et al. 2017; Ragetti et al. 2017). Des Weiteren gelten Städte als stärker von Hitze betroffen als ländliche Regionen. Hier spielen vor allem die Bausubstanz, der höhere Versiegelungsgrad und der reduzierte Vegetationsbestand eine Rolle (Krug und Mücke 2018). Entsprechend lassen sich in Städten häufiger Heiße Tage und Tropennächte beobachten (Krug und Mücke 2018), die nicht zuletzt eine höhere Morbiditäts- und Mortalitätsrate in urbanen Agglomerationen bedingen (Kuttler 2018); siehe auch Handlungsfeld „Bauwesen“.

Bereits heute ist die Hitzebelastung innerhalb Deutschlands – entsprechend der geographischen Lage, der Geländetopografie und der Landnutzung (Krug und Mücke 2018) – regional und lokal sehr unterschiedlich ausgeprägt. So werden Hitzewellen besonders in südwestlichen und östlichen Regionen Deutschlands beobachtet (siehe Karte der Normalwerte (1961 bis 1990) für die

Heißen Tage)³⁴. Es ist anzunehmen, dass der Klimawandel die negativen Gesundheitsauswirkungen in den bereits belasteten Regionen verschärft. „Dies bedeutet, dass vor allem auf Süddeutschland in Zukunft eine stärkere Belastung durch Hitze (insbesondere das gleichzeitige Auftreten von Hitze und hoher Luftfeuchte) und rasche Temperaturänderungen zukommt“ (sic; Zacharias und Koppe 2015; S. 26).

Obwohl die Hitzebelastung des Menschen ein schon umfangreich erforschtes Thema ist, ist es – nicht zuletzt aufgrund seiner Bedeutung – weiterhin Thema von Forschungsprojekten. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) forscht beispielsweise aktuell im Rahmen des Verbundprojektes „Stadtklima: Entwicklung eines leistungsstarken Stadtklimamodells“ an der Bewertung der thermischen Belastung von Menschen in Städten (Maronga et al. 2020). Offene Fragen gibt es auch noch dahingehend, wie die besonders betroffenen Bevölkerungsgruppen und hier insbesondere sozial benachteiligte Gruppen in Analysen wie der vorliegenden KWRA 2021 besser abgebildet werden können. Daten zur räumlichen Verteilung und zur Ausprägung der Sensitivität dieser besonders betroffenen Bevölkerungsgruppen stehen bisher kaum zur Verfügung. Wertvoll wären beispielsweise räumlich hochaufgelöste Daten zu Altersstruktur, Armut, Einpersonenhaushalten und Schulabschlüssen.

Grundlage der Operationalisierung

Um die Hitzebelastung für die Bevölkerung räumlich differenziert abzubilden, war es zunächst notwendig, eine eindeutige Definition des Begriffs „Hitzeperiode“ zu finden, denn in der Literatur gibt es verschiedene Definitionen. Im Rahmen der KWRA 2021 ist eine Hitzeperiode als Aufeinanderfolge von mindestens drei Heißen Tagen (Tageshöchsttemperatur ≥ 30 Grad Celsius) und drei Tropennächten (Tagestiefsttemperatur ≥ 20 Grad Celsius) definiert. Gezeigt wird zum einen die Anzahl dieser Hitzeperioden im Jahr, als auch deren Dauer (eine Übersicht aller Indikatoren zeigt Tabelle 46). Die Dauer ist dabei als mittlere Anzahl der Tage je Hitzeperiode angegeben.

Um die besondere Situation von Städten beziehungsweise dicht bebauten Gebieten zu berücksichtigen, wurde der klimatische Einfluss um das Ergebnis der Vorwirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“ ergänzt. Eine Beschreibung der Operationalisierung dieser Vorwirkung ist im Handlungsfeld „Bauwesen“ zu finden (siehe „Stadtklima/Wärmeinseln“ im Handlungsfeld „Bauwesen“).

Jeder Mensch kann Hitzebelastung erleiden. Das betroffene System dieser Klimawirkung ist folgerichtig die gesamte Bevölkerung; eine Begrenzung des betroffenen Systems in der Operationalisierung auf bestimmte Bevölkerungsgruppen oder Räume wurde diskutiert, aber verworfen. Als Indikator für die räumliche Exposition wurde eine bereinigte Form der Bevölkerungsdichte gewählt: die Zahl der Einwohnerinnen und Einwohner je Hektar Siedlungsfläche. Als Siedlungsfläche gelten dabei Flächen städtischer Prägung, wie sie für die sozioökonomischen Szenarien definiert sind (Behmer 2020). Die sozioökonomischen Szenarien sind Datenquelle sowohl für die Einwohnerzahl als auch für die Flächen städtischer Prägung. Für die Bezugsperiode werden zusätzlich Daten des Zensus 2011 gezeigt, die in einer Auflösung von ein mal einem Kilometer vorlagen und das Bild für die Bezugsperiode somit räumlich stärker differenzieren. Zusätzlich werden die absoluten Einwohnerzahlen für die Kreise gezeigt.

Sensitivitätsfaktoren, die in die Analyse eingingen, sind der Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahren an der Gesamtbevölkerung und der Anteil der Einpersonenhaushalte an allen Haushalten (Tabelle 46). Für den Indikator „Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahre“ wurden für die Bezugsperiode ebenfalls zusätzlich Daten des Zensus 2011 abgebildet. Projektionen dieses Indikators waren für

³⁴ Siehe auch: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html

die Ebene der Landkreise verfügbar. Der Indikator repräsentiert die vergleichsweise sensitive Bevölkerungsgruppe der älteren Menschen. Besser noch wäre es gewesen, den Anteil der Hochaltrigen mit einem Alter von mindestens 75 oder 80 Jahren abzubilden, da sie besonders sensitiv sind. Hierzu lagen aber keine Projektionen vor.

Der Anteil der Einpersonenhaushalte an allen Haushalten bietet einen Hinweis auf soziale Isolation. Er konnte nur für die Bezugsperiode abgebildet werden – die Daten stammen ebenfalls aus dem Zensus 2011, sind räumlich aber gröber aufgelöst. Projektionen lagen zu diesem Indikator nicht vor. Bei der Interpretation dieses Indikators ist zu berücksichtigen, dass das Wohnen in einem Einpersonenhaushalt nicht mit sozialer Isolation gleichzusetzen ist. Auch sind nicht alle sozial isolierten Menschen hoch sensitiv gegenüber Hitze. Wenn Menschen, die sich selbst nur eingeschränkt versorgen können oder beispielsweise aufgrund ihres Alters zu trinken vergessen, allein wohnen, besteht aber eine erhöhte Sensitivität. Daher ist dieser Indikator mit anderen in einen Zusammenhang zu setzen.

Tabelle 46: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Hitzebelastung“

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Anzahl von Hitzeperioden im Jahr	Mittlere Anzahl von Hitzeperioden im Jahr (definiert als Abfolge von mindestens drei heißen Tagen und Tropennächten in Folge)	GE-KL-01
Dauer von Hitzeperioden	Mittlere Anzahl von Tagen je Hitzeperiode	GE-KL-02
Wärmebelastung in Städten	Maximale Wärmeinselintensität (UHI_{max})	BAU-KL-05
Bevölkerungsdichte	Bevölkerungsdichte (Anzahl der Einwohnerinnen und Einwohner je Hektar Siedlungsfläche)	GE-SO-03
Einwohnerzahl	Anzahl der Einwohnerinnen und Einwohner je Kreis	GE-SO-04
Altersstruktur der Bevölkerung	Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahre	GE-SO-05
Soziale Isolation	Anteil der Einpersonenhaushalte	GE-SO-06

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Die einzelnen Faktoren wurden auf Beschluss der Fachleute, die bei dem im Rahmen der KWRA 2021 im Oktober 2019 durchgeführten Expertenworkshop „Stadtklima und Hitzebelastung“ anwesend waren, nicht miteinander verrechnet. Auch eine Kategorisierung der einzelnen Faktoren fand nicht statt. Hintergrund ist, dass das Wissen über die einzelnen Faktoren, die zu einer Hitzebelastung führen können, zwar bereits ziemlich umfassend, das Zusammenwirken der Faktoren jedoch so komplex ist, dass die Wirkzusammenhänge mit einer einfachen mathematischen Verrechnung nicht valide abgebildet werden können. Darüber hinaus gibt es vielfältige weitere Faktoren, die zu Hitzebelastung führen können die in diese Analyse nicht als Datensätze einfließen konnten.

Nach Einschätzung der Fachleute können mit den hier abgebildeten Daten – sofern sie einzeln betrachtet werden – aber mit großer Sicherheit wesentliche räumliche und zeitliche Muster der Hitzebelastung sensibler Bevölkerungsgruppen in Deutschland abgebildet werden.

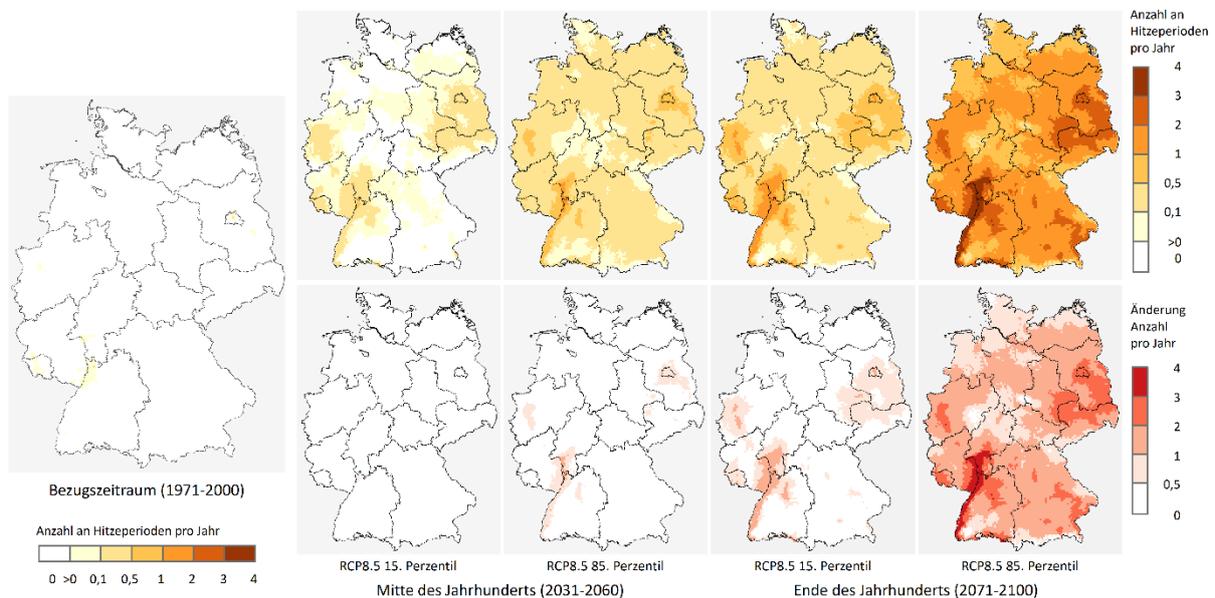
Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen, sofern es nicht anders vermerkt ist. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und

ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, "Konzept und Methodik").

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Im Bezugszeitraum waren Hitzeperioden mit drei heißen Tagen und drei Tropennächten in Folge noch selten.³⁵ In besonders warmen, räumlich aber sehr kleinen Regionen Berlins und des Oberrheingrabens kamen sie statistisch etwa dreimal in 30 Jahren vor (das entspricht einem Wert von rund 0,1 Hitzeperioden pro Jahr in Abbildung 14; es handelt sich um einzelne Pixel, so dass sie in der Abbildung kaum zu sehen sind). Im restlichen Deutschland waren sie noch seltener. Wenn solche Hitzeperioden eintraten, waren sie in der Bezugsperiode in Berlin im Mittel bis zu fünf Tage lang. In der Regel dauerten sie drei Tage, im nördlichen Oberrheingraben, im Rhein-Main-Gebiet und im Norden des Saarlands vereinzelt auch bis zu vier Tage (Abbildung 15).

Abbildung 14: Mittlere Anzahl der Hitzeperioden pro Jahr

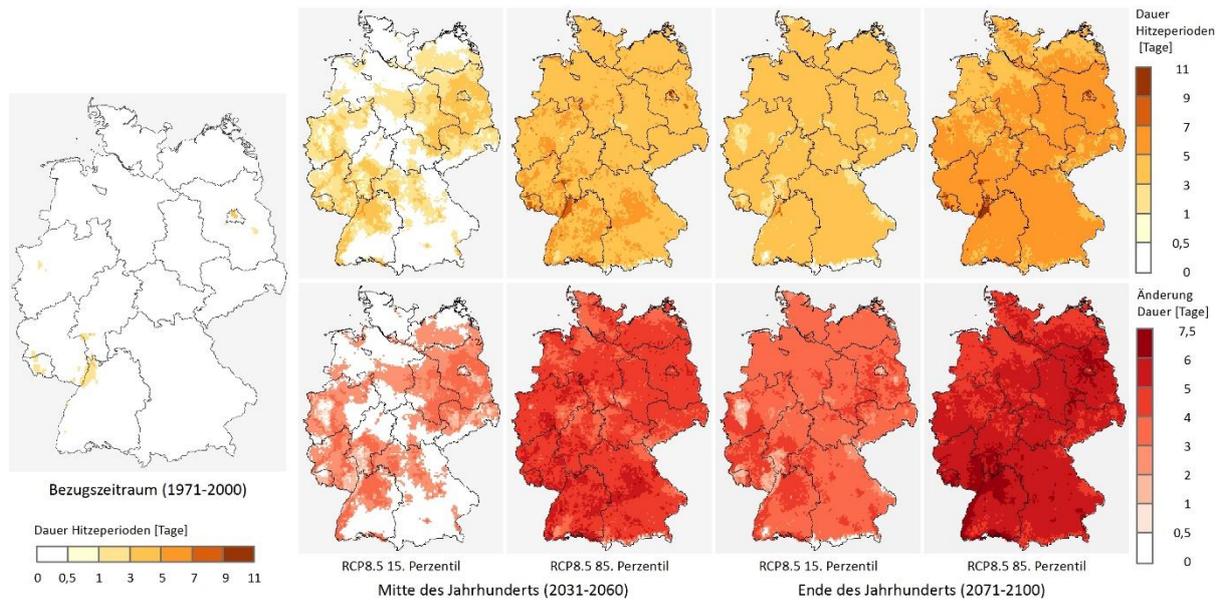


Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hinweis: Hitzeperioden sind definiert als Abfolge von mindestens drei heißen Tagen und drei Tropennächten in Folge. Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich hier und in den folgenden Abbildungen jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

³⁵ Dass solche Hitzeperioden im Bezugszeitraum so selten waren, begründet sich insbesondere mit den in diesem Zeitraum noch seltenen konsekutiven Tropennächten. Diese sind für die menschliche Gesundheit jedoch von großer Bedeutung, da sie die Regeneration bei Nacht stark einschränken. Trotz des bisher seltenen Auftretens von so bemessenen Hitzeperioden, haben die Hitzesommer in der Vergangenheit jeweils zu einem signifikant ausgeprägten Anstieg der Hitzemortalität geführt.

Abbildung 15: Mittlere Dauer der Hitzeperioden in Tagen je Hitzeperiode



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hitzeperioden sind definiert als Abfolge von mindestens drei heißen Tagen und drei Tropennächten in Folge. Die Karten, die die Mitte und das Ende des Jahrhunderts abbilden, können auch Pixel mit einer mittleren Dauer der Hitzeperioden kleiner drei Tage enthalten. Grund dafür ist, dass die von Modellen projizierten Änderungen auf interpolierte Messdaten addiert wurden. Die Änderungen werden aus den Klimaprojektionsensembles abgeleitet, auch an Orten, an denen in den Referenzdaten keine Hitzeperioden vorkamen. Addiert man diese auf, führt dies auf Werte kleiner als drei.

Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die kleineren Karten zeigen Zustands- und Änderungswerte für die Zukunft.

Die vorgelagerte Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“ wird ausführlich Handlungsfeld „Bauwesen“ beschrieben. Die Daten zeigen, dass bereits im Bezugszeitraum (hier das Jahr 2015) Siedlungsräume deutlich wärmer waren als ihr Umland. Besonders hohe Werte der maximalen Wärmeinselintensität zeigen sich in der Bezugsperiode in Metropolen wie Berlin, Hamburg und München, im Städteverbund des Rhein-Ruhr-Gebiets sowie in Städten der Größe von Dresden oder Erfurt. Doch auch kleinere Städte erreichten bereits in der Bezugsperiode vergleichsweise hohe UHI_{max} -Werte (größer vier Kelvin bei einem deutschlandweiten Maximum größer fünf Kelvin)³⁶, etwa Bamberg oder Brandenburg an der Havel.

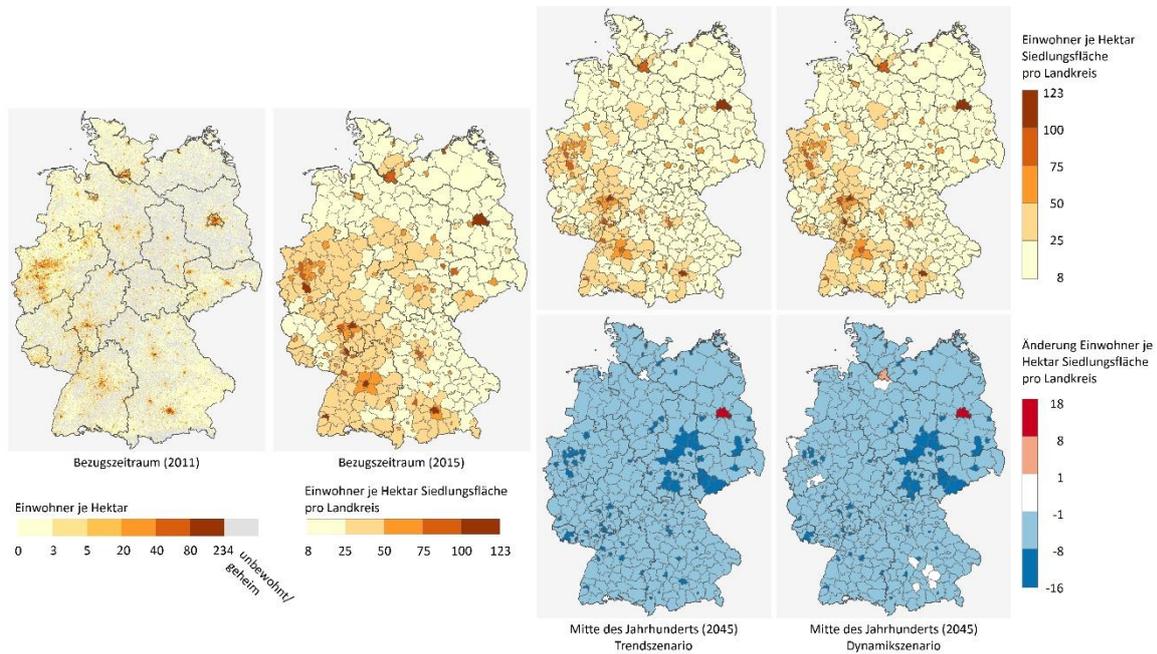
In dicht besiedelten Gebieten nimmt aufgrund der Bebauung nicht nur das Wärmeiselpotenzial zu, sondern auch die Zahl der von Hitzebelastung betroffenen Personen. Die Daten des Zensus 2011 zeigen hochverdichtete Innenstädte in den Metropolen mit mehr als 233 Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar (das entspricht mehr als 23.200 Einwohnerinnen und Einwohnern pro Quadratkilometer) in einzelnen Quartieren in Berlin und einer maximalen Bevölkerungsdichte von mehr als 226 Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar in München. Nürnberg und Hamburg haben Quartiere mit mehr als 200 Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar (Abbildung 16).

Die für die sozioökonomischen Szenarien als Bezug verwendeten Daten des Jahres 2015 zeigen mehr als 100 Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar im Mittel in den Städten Frankfurt am Main, Offenbach am Main, München, Stuttgart, Mannheim, Berlin, Köln und Freiburg im Breisgau. Die größte Stadt ist Berlin mit rund 3,5 Millionen Einwohnerinnen und Einwohnern im Jahr

³⁶ Der hier genannte modellierte maximale UHI_{max} -Wert wird in der Realität noch übertroffen. Eine Diskussion des Modells und seiner Annahmen ist im Kapitel „Stadtklima/Wärmeinseln“ im Handlungsfeld „Bauwesen“ zu finden.

2015. Mehr als eine Millionen Einwohnerinnen und Einwohner hatten außerdem Hamburg, München, der Landkreis Region Hannover und Köln (Abbildung 17).

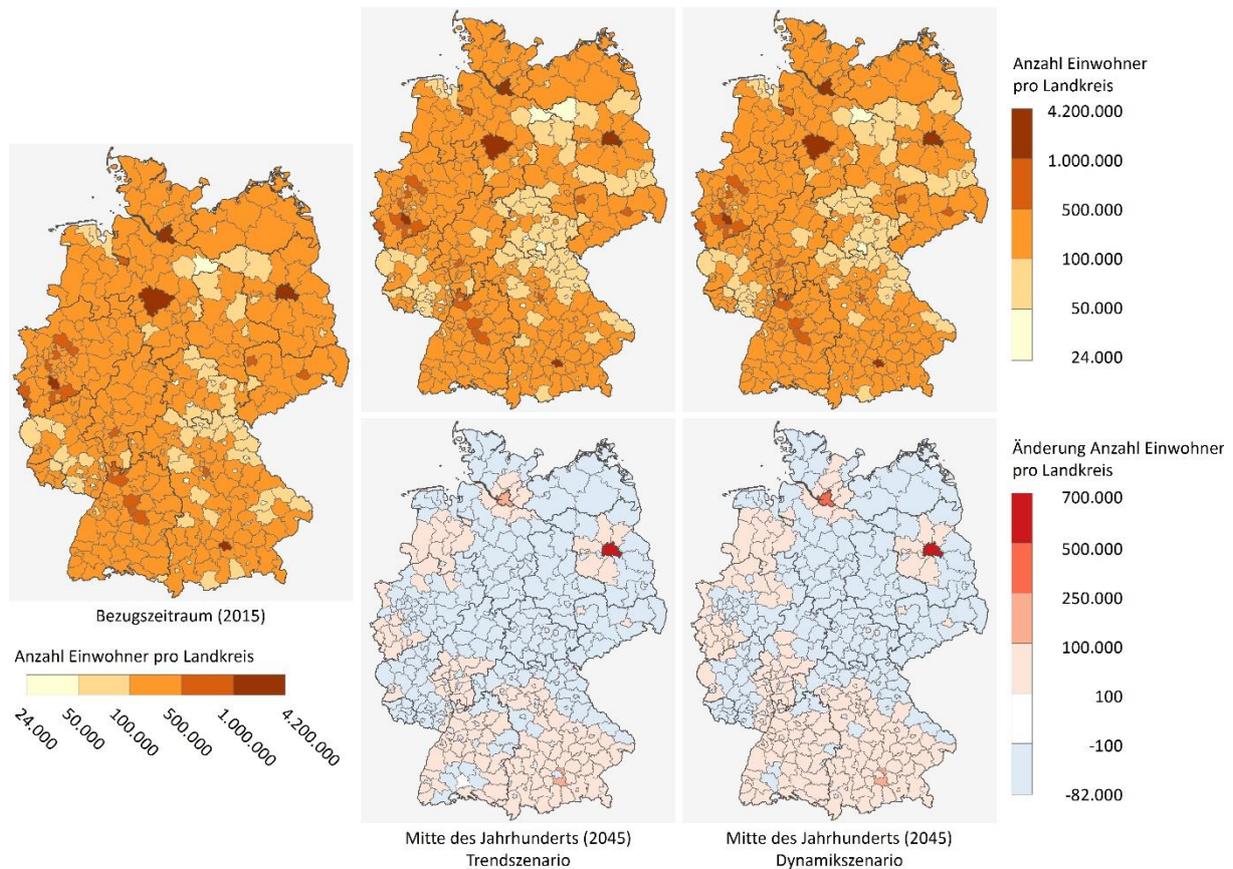
Abbildung 16: Bevölkerungsdichte in Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar



Datengrundlagen: Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2015 (Bezugszeitraum links) sowie GWS 2019 (Bezugszeitraum rechts und Projektionen)

Die linke große Karte zeigt die Bevölkerungsdichte in Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar für das Jahr 2011, basierend auf Daten des Zensus. Die rechte große Karte zeigt auf Ebene der Landkreise die Bevölkerungsdichte in Einwohnerinnen und Einwohnern je Hektar Siedlungsfläche für das Jahr 2015. Als Siedlungsfläche zählen „Flächen städtischer Prägung“. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt denselben Indikator für das Jahr 2045, die untere Reihe kleiner Karten die Änderungswerte gegenüber dem Bezugszeitraum 2015.

Abbildung 17: Anzahl der Einwohnerinnen und Einwohner auf Kreisebene

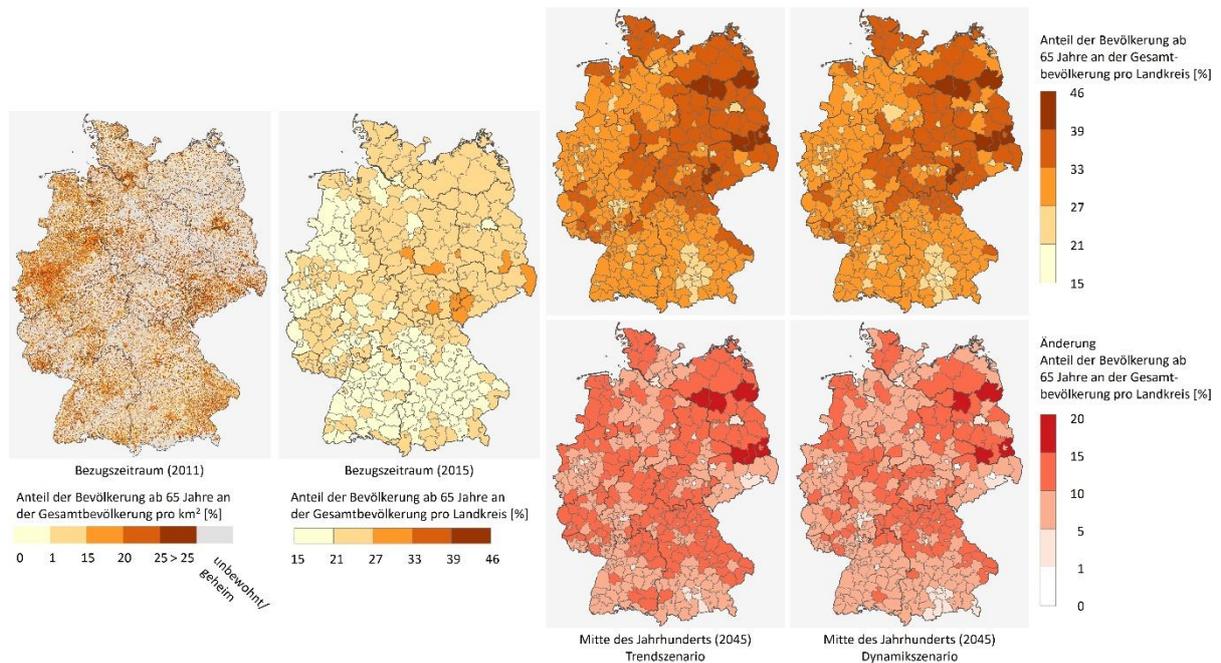


Datengrundlagen: GWS 2019

Die linke Karte zeigt auf Ebene der Landkreise die Anzahl der Einwohnerinnen und Einwohner für das Jahr 2015. Die obere Reihe der Karten auf der rechten Seite zeigt denselben Indikator für das Jahr 2045, die untere Reihe kleiner Karten die Änderungswerte gegenüber dem Bezugszeitraum 2015.

Die Daten zum Anteil der Menschen mit einem Alter von mindestens 65 Jahren an der Gesamtbevölkerung aus dem Zensus 2011 lagen klassifiziert und (mit größeren Datenlücken in ländlichen Regionen) auch in absoluten Werten vor. In den klassifizierten Daten ist zu sehen, dass es deutschlandweit Gebiete gibt, in denen der Anteil älterer Menschen 25 Prozent und mehr beträgt – sowohl in städtischen als auch in ländlichen Regionen (Abbildung 18). Bei Betrachtung der nicht-kategorisierten Werte (in dieser Analyse nicht bildlich dargestellt) fiel auf, dass jene Pixel mit einem sehr hohen Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung (≥ 80 Prozent) nur selten innerhalb kreisfreier Städte liegen. Auch Pixel mit 60 Prozent bis 80 Prozent älteren Menschen liegen selten in diesen Städten, insbesondere nicht im Zentrum. Daraus kann geschlossen werden, dass Gebiete mit einem hohen Anteil älterer Personen eher in Kleinstädten und ländlichen Regionen zu finden sind. Es kann jedoch nicht per se abgeleitet werden, dass diese besonders sensitive Bevölkerungsgruppe nur selten in aufgrund des Wärmeinseleffektes stark von Hitze betroffenen Innenstädten wohnt. Zum einen sind die Bevölkerungsdichten in diesen Innenstädten teilweise so hoch, dass die absolute Zahl von dort wohnenden Älteren auch dann im Vergleich hoch sein kann, wenn ihr Anteil nicht auffallend hoch ist. Zum anderen haben die Temperaturrekorde im Jahr 2019 in Lingen (Ems) mit seinen rund 54.000 Einwohnerinnen und Einwohnern und im Jahr 2015 in Kitzingen mit rund 22.000 Einwohnerinnen und Einwohnern gezeigt (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2020), dass auch kleinere (gegebenfalls nicht kreisfreie) Städte überhitzen können (Bissolli et al. 2019).

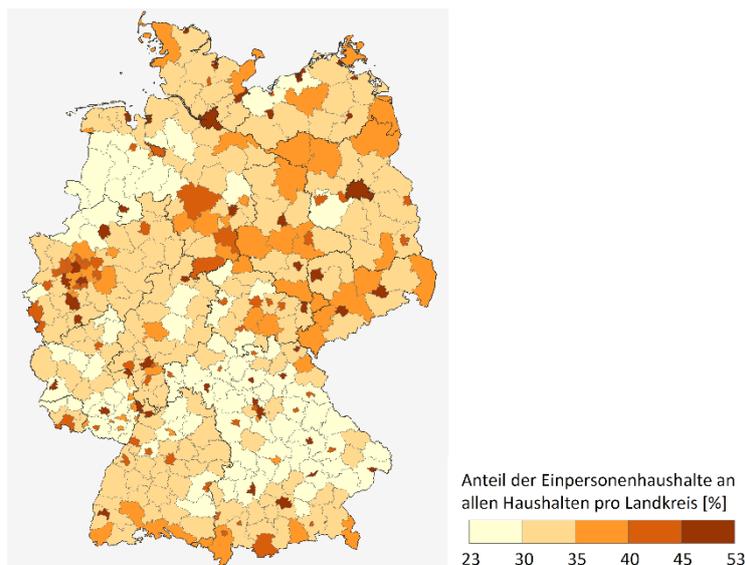
Abbildung 18: Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahre an der Gesamtbevölkerung in Prozent



Datengrundlagen: Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2015 (Bezugszeitraum) sowie GWS 2019 (Projektionen)

Der Anteil der Einpersonenhaushalte an allen Haushalten schwankte im Jahr 2011 zwischen rund 23 Prozent im Landkreis Cloppenburg und rund 53 Prozent in Regensburg (Abbildung 19). Den höchsten Anteil von Einpersonenhaushalten hatten nach Regensburg (in absteigender Reihenfolge) Würzburg, Flensburg, Passau, München und Düsseldorf (jeweils ≥ 50 Prozent). Diese Städte sind Standorte von Hochschulen, insofern steht infrage, inwieweit mit diesem Indikator soziale Isolation, insbesondere soziale Isolation Älterer, hinreichend gut abgebildet werden kann.

Abbildung 19: Anteil der Einpersonenhaushalte an allen Haushalten in Prozent



Datengrundlage: Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird sich die mittlere Anzahl der Hitzeperioden im Jahr gegenüber dem Bezugszeitraum in vielen Regionen voraussichtlich leicht erhöhen. Im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) können es in Teilen des Oberrheingrabens bis zu rund 0,6 Hitzeperioden im Jahr mehr werden. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) könnte die Zunahme in der Region Berlin, am Niederrhein und im Oberrheingraben rund eine Hitzeperiode im Jahr betragen. In Teilen des Oberrheingrabens gäbe es dann im Mittel mehr als eine Hitzeperiode im Jahr (Abbildung 14).

Im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) gäbe es in Deutschland zahlreiche Regionen, in denen die Dauer der Hitzeperioden konstant bliebe. Dort, wo die Dauer der Hitzeperioden im optimistischen Fall laut Projektionen zunimmt, verlängert sie sich um bis zu vier Tage. Dabei sind Änderungen von drei bis vier Tagen beispielsweise im Osten Deutschlands möglich sowie an Rhein, Main und Mosel. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) würde die Dauer der Hitzeperioden bis zur Mitte des Jahrhunderts in ganz Deutschland zunehmen. Vereinzelt könnten Hitzeperioden bis zu 7,5 Tage länger andauern. In den meisten Regionen wären Hitzeperioden im Mittel vier bis sechs Tage länger als im Bezugszeitraum. Unter anderem in Berlin, in Teilen des Saarlands sowie im Oberrheingraben südöstlich des Taunus und östlich des Pfälzerwalds würden Hitzeperioden dann durchschnittlich mehr als sieben Tage andauern (Abbildung 15).

Die maximale Wärmeinselintensität (UHI_{max}) steigt bis zur Mitte des Jahrhunderts laut Modellierung vor allem am Stadtrand vieler Städte, in den Innenstädten ist wenig Entwicklung zu sehen. Dies hängt auch mit der Methodik der Modellierung zusammen, denn Flächen städtischer Prägung werden nicht danach differenziert, wie dicht die Bebauung ist (siehe „Stadtklima/Wärmeinseln“ im Handlungsfeld „Bauwesen“). Innerstädtische Nachverdichtung bildet sich folglich nur ab, wenn Brachen oder städtische Grün- und Erholungsflächen bebaut werden. Aufgrund einer stärkeren Urbanisierung ist die flächenmäßige Ausdehnung stark belasteter Gebiete im DynamikszENARIO größer als im Trendszenario. Das DynamikszENARIO steht damit für den pessimistischen Fall.

Die Projektionen zur Anzahl der Einwohnerinnen und Einwohner auf Kreisebene zeigen vor allem eine deutliche Zunahme der Bevölkerung in Berlin, Hamburg und dem Umland von München (Abbildung 17). Insbesondere im DynamikszENARIO (auch hier der pessimistische Fall) steigt die Zahl der Einwohnerinnen und Einwohner in vielen großen Städten und ihrem Umland. Im Trendszenario hingegen zeigen einige der Städte wie München oder Frankfurt am Main (im Gegensatz zu ihrem Umland) eine leicht abnehmende Einwohnerzahl. Ausnahme ist das Ruhrgebiet, wo viele Städte in beiden Zukunftsszenarien Bevölkerung verlieren. Gleichzeitig nimmt die Bevölkerungsdichte in beiden Szenarien nur in sehr wenigen Städten oder Kreisen zu (Abbildung 16). Erkennbar ist hier der bereits zu beobachtende Trend, dass die Stadtregionen wachsen und damit außerhalb der Städte eine leichte Abnahme der Bevölkerungsdichte verbunden ist. Die Bevölkerung konzentriert sich in größer werdenden Stadtregionen. Dort, wo neuer Wohnraum entsteht, wird pro Person mehr Fläche in Anspruch genommen. Die Siedlungsfläche am Stadtrand und im städtischen Umland nimmt somit mehr zu als die Einwohnerzahl, womit die Bevölkerungsdichte sinkt, obwohl im Umland der Städte die Einwohnerzahl steigt. Das bedeutet letztlich, dass die verdichteten Bereiche und damit die Bereiche, die vom Wärmeinsellefekt betroffen sind, immer größer werden. Denn auch wenn die Bevölkerungsdichte leicht abnimmt, bleibt sie in der Regel doch auf einem hohen Niveau. Zudem sind mit den sich ausweitenden Städtereichen möglicherweise mehr Pendlerbewegungen verbunden und damit eine Zunahme des Verkehrs.

Der Anteil der Personen mit einem Alter von mindestens 65 Jahren an der Gesamtbevölkerung nimmt bis zur Mitte des Jahrhunderts zu – sowohl im Trend- als auch im DynamikszENARIO. Am stärksten steigt der Anteil in einigen ländlichen Regionen des Ostens der Bundesrepublik. Laut Projektionen könnte es in der Mitte des Jahrhunderts in Brandenburg Landkreise mit durchschnittlich mehr als 40 Prozent Einwohnerinnen und Einwohnern dieser Altersklasse geben (Abbildung 18). In vielen Kreisen ist der Anteil der Personen mit einem Alter von mindestens 65 Jahren an der Gesamtbevölkerung im Trendszenario höher als im DynamikszENARIO. Da ein höherer Anteil alter Menschen an der Gesamtbevölkerung die Klimawirkung verstärkt, ist das DynamikszENARIO in der Nomenklatur der KWRA 2021 als optimistischer Fall zu bezeichnen.

Projektionen zum Anteil der Einpersonenhaushalte an den Haushalten liegen für diese Analyse nicht vor. Es kann aber angenommen werden, dass sich die räumlichen Strukturen, wie sie im Abschnitt „Ergebnisse für den Bezugszeitraum“ beschrieben sind, bis zur Mitte des Jahrhunderts nicht wesentlich verändern. Wenn mit dem zunehmenden Anteil älterer Menschen verbunden sein sollte, dass mehr von ihnen allein wohnen, wäre das mit Blick auf die Klimawirkung als ungünstig zu bewerten.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Die mittlere Anzahl der Hitzeperioden im Jahr nimmt bis zum Ende des Jahrhunderts gegenüber dem Bezugszeitraum möglicherweise deutlich zu (Abbildung 14). In dem hier dargestellten optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) gäbe es unter anderem in Teilen Berlins, im Oberrheingraben und am Niederrhein ein bis zwei Hitzeperioden mehr im Jahr als in der Bezugsperiode. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) nähme die Anzahl der Hitzeperioden fast deutschlandweit deutlich zu. Ausnahmen wären die Mittelgebirge der Mitte und des Südens der Republik sowie das Alpenvorland und die Alpen. Bemerkenswert ist die mögliche Zunahme der Anzahl der Hitzeperioden im norddeutschen Tiefland, wo die Bevölkerung heute noch vergleichsweise wenig an Hitzeperioden gewöhnt ist (Abbildung 14).

Für die menschliche Gesundheit ist zudem bedeutend, dass die hier ausgewerteten Projektionen für den pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) eine Zunahme der Anzahl und Dauer von Hitzeperioden im Frühjahr zeigen. Hitzeperioden im Frühjahr belasten den menschlichen Körper besonders stark. Bereits in der Mitte des Jahrhunderts könnte es im pessimistischen Fall in Teilen des Oberrheingrabens im 30-jährigen Mittel bis zu 0,03 Hitzeperioden im Frühjahr mehr geben. Außerdem könnten die Hitzeperioden dort bis zu vier Tage länger andauern. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnten größere Landesteile von einer Zunahme der Anzahl und Dauer von Hitzeperioden im Frühjahr betroffen sein. Im Osten Deutschlands gäbe es im 30-jährigen Mittel bis 0,1 Hitzeperioden mehr je Frühjahr, an Nieder- und Oberrhein könnte es eine Zunahme bis zu 0,14 beziehungsweise 0,17 Hitzeperioden je Frühjahr geben. Die Hitzeperioden könnten im Osten Deutschlands bis zu vier Tage und am Nieder- und Oberrhein bis zu fünf Tage länger andauern. Dies könnte für die menschliche Gesundheit in diesen Regionen starke Belastungssituationen verursachen. Im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) würden sich selbst bis zum Ende des Jahrhunderts Anzahl und Dauer der Hitzeperioden im Frühjahr nicht verändern.

Über das ganze Jahr gesehen, könnte die Dauer von Hitzeperioden in einigen Regionen Deutschlands bis zum Ende des Jahrhunderts verglichen mit dem Bezugszeitraum deutlich zunehmen. Im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) könnten Hitzeperioden bis zu 7,5 Tage dauern, im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) sogar bis zu elf Tage. Die Länge von Hitzeperioden könnte sich also teilweise mehr als verdreifachen. Die besonders stark belasteten Gebiete

lägen weiterhin im Südwesten und im Osten Deutschlands. Am längsten wären die Hitzeperioden im Berliner Raum, in Teilen des Oberrheingrabens (vor allem auf Höhe des Pfälzerwaldes) und im südwestlichen Saarland.

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die hier abgebildeten räumlichen Muster mit der verwendeten Definition einer Hitzeperiode zusammenhängen. Es gibt Ansätze, die Hitze nicht über statische Schwellenwerte definieren, beispielsweise den von Kyselý et al. (2011), und so berücksichtigen, dass Menschen unterschiedlich gut an Hitze angepasst sind. So ist die physische und psychische Belastung von jemandem, der im kühleren Klima an der Küste Deutschlands wohnt, an einem Tag mit einer Lufttemperatur von 30 Grad Celsius beispielsweise deutlich höher als die Belastung von jemandem, der im Oberrheingraben wohnt und solche Temperaturen öfter erlebt. Vor diesem Hintergrund ist es bemerkenswert, dass – verwendet man eine solche relative Definition einer Hitzeperiode, die sich an Kyselý et al. (2011) anlehnt³⁷ – im Alpenraum gegen Ende des Jahrhunderts die meisten Hitzewellen auftreten könnten, weil die Temperaturen hier stärker ansteigen. Auch könnten Hitzeperioden nach dieser Definition im Alpenraum, im Voralpenland und an den Küsten relativ gesehen länger andauern. Menschen, die in Regionen leben, die in der Bezugsperiode und in der Mitte des Jahrhunderts noch wenig von Hitze betroffen waren, könnten am Ende des Jahrhunderts demnach besonders stark belastet sein.

Zur maximalen Wärmeinselintensität (UHI_{max}) können für das Ende des Jahrhunderts keine räumlich differenzierten Aussagen getroffen werden, da eine Modellierung für diesen Zeitraum nicht verfügbar ist. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Fläche der Gebiete mit vergleichsweise hohen Werten weiter zunimmt, sollten die Städte auch in diesem Zeitraum weiter wachsen und sich ausbreiten. Das Wärmeinselpotenzial innerhalb der Städte könnte ebenfalls weiter zunehmen, falls Innenstädte weiter verdichtet werden und Grünflächen und Brachen dabei verloren gehen.

Projektionen der Indikatoren für die Sensitivität und das räumliche Vorkommen gibt es für das Ende des Jahrhunderts nicht. Soziale Entwicklungen sind von zu vielen Faktoren abhängig, als dass sie sich so weit in die Zukunft projizieren ließen. Jede Aussage wäre mit sehr großen Unsicherheiten verbunden, daher wird hier darauf verzichtet, gesellschaftliche Zusammenhänge für das Ende des Jahrhunderts zu beschreiben. Es ist aber anzunehmen, dass die heutigen Städte die Bevölkerungszentren bleiben.

³⁷ Verwendet wird hier ein Ansatz, der eine Hitzeperiode als Abfolge von mindestens drei Tagen definiert, deren Tagesmitteltemperaturen das 95. Perzentil der Tagesmitteltemperaturen im Sommer (April bis Oktober) erreichen.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 47: „Hitzebelastung“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	hoch	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		hoch		mittel	

Kernaussagen zu „Hitzebelastung“

- ▶ Hitzebelastung kann schwerwiegende physische und psychische Folgen haben. Besonders betroffen sind Personen mit Vorerkrankungen und Menschen im Alter von 75 und mehr Jahren.
- ▶ Der soziale und der ökonomische Status können Einfluss auf die Hitzebelastung haben.
- ▶ Hitzebelastung wird zunehmen. Ursache dafür ist nicht nur die steigende Anzahl von Hitzeperioden im Jahr und ihre zunehmende Dauer. Die Verdichtung von Innenstädten und die zunehmende Konzentration der Bevölkerung in größer werdenden Ballungszentren tragen ebenfalls dazu bei. Die Verdichtung von Innenstädten wird den Wärmeinseleffekt noch verstärken, während das Wachstum der Städte ins Umland die Fläche der Wärmeinseln vergrößert.
- ▶ Gleichzeitig steigt die Sensitivität der Bevölkerung im Zuge des demographischen Wandels.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Hitzebelastung“

Zu den Sensitivitätsfaktoren zählen physiologische Faktoren wie Vorerkrankungen (Zacharias und Koppe 2015; Bunz 2016; Krug und Mücke 2018; Muthers und Matzarakis 2018) und Alter (Kleinkinder und Altersgruppe der über 65-Jährigen) (Scherer et al. 2013; Bunker et al. 2016; Vicedo-Cabrera et al. 2016; Ragetti et al. 2017; an der Heiden et al. 2019a). Weitere Faktoren sind sozioökonomische Aspekte wie ein geringes Einkommen, der Berufs- und Beziehungsstatus, die soziale, sprachliche und kulturelle Integration und die Wohnsituation beziehungsweise Haushaltgröße (auch in Kombination mit dem Alter, Einpersonenhaushalte als Hinweis auf soziale Isolation) (Rooney et al. 1998; NCCEH 2010; Minister of Health Canada 2011; Berry et al. 2014; Wiesböck et al. 2016; Mayrhuber et al. 2018). Bezüglich der Wetter- und Umweltexposition stellt eine Hitzewelle in den frühen Sommermonaten eine größere Gefahr aufgrund der fehlenden Akklimatisation dar (Minister of Health Canada 2011; Muthers et al. 2017; Ragetti et al. 2017).

Die räumliche Exposition bei dieser Klimawirkung hängt stark mit der Bebauungs- und Bevölkerungsdichte zusammen. In urbanen Räumen treten heiße Tage und Tropennächte tendenziell häufiger auf (Krug und Mücke 2018; Matzarakis 2018). Relevant sind außerdem die Gebäudegestaltung und Bausubstanz, der Grad der Bodenversiegelung und der Vegetationsbestand (Baumüller 2018; Hackenbruch 2018; Krug und Mücke 2018). Zudem spielen die geographische Lage und die Geländetopografie eine Rolle (Krug und Mücke 2018). Hitzewellen sind besonders in Südwest- und Ostdeutschland zu beobachten. Die hier genannten Faktoren bilden Ansatzpunkte, um gesundheitliche Beeinträchtigungen infolge klimawandelassoziierter Hitzebelastung einzudämmen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Allgemein gilt für den Umgang mit Hitzebelastung durch häufigere und längere Hitzeperioden, dass Vorkehrungen sowohl auf individueller Ebene getroffen als auch umfassender (gesamtge-

sellschaftlich) ansetzende Maßnahmen ergriffen werden können. Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung der klimawandelbedingt potenziell zunehmenden Hitzebelastung beitragen sollen:

Tabelle 48: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Hitzebelastung“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
4.1	Staatliche Regelungen zum Arbeitsschutz	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Arbeitsschutzmaßnahmen sorgen für den Schutz vor arbeitsbedingten Gefährdungen, die aus dem Klimawandel resultieren, wie Hitze; bestehende Vorschriften und staatliche Regeln zum Arbeitsschutz werden geprüft und möglicher Anpassungsbedarf bestimmt; dies betrifft beispielsweise technische Regeln für Arbeitsstätten
4.3-4.7	Zielgruppenspezifische Information für Fachleute im Gesundheitssektor; Informationsmaterialien und -tools zur Schulung und Aufklärung für verschiedene Zielgruppen	Wissen (Bildung, Aus-/Weiterbildung); Motivation und Akzeptanz	Für Arbeitgeberinnen und Arbeitgeber und für Beschäftigte in Betrieben werden zielgruppenspezifische Informationsmaterialien (zum Beispiel zu vulnerablen Gruppen) und Empfehlungen in Bezug auf die gesundheitliche Belastung durch Hitze und notwendige Schutzmaßnahmen bereitgestellt. Durch die Entwicklung von Informations- und Schulungsangeboten (zum Beispiel Multiplikatoren-schulung) über präventive und gesundheitsfördernde Maßnahmen sollen Wissenslücken im Bereich der gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels geschlossen werden. Weiterbildungsmaßnahmen im Sozial-, Gesundheits- und Pflegebereich (unter anderem durch das Öffentliche Gesundheitswesen) werden durch den Bund unterstützt. Eine Anpassung der Erziehungs- und Bildungspläne für Einrichtungen frühkindlicher Erziehung und der Lehrpläne für Schulen und nachfolgende Ausbildungseinrichtungen wird unterstützt (Mücke et al. 2013; Ziolo und Matzarakis 2018). Hierzu wird ein Grundlagenkatalog zur Erstellung von Lehr- und Ausbildungsplänen für die Vermittlung von Fachkenntnissen über die gesundheitlichen Wirkungen der Hitzebelastung und den daraus ableitbaren Präventionsmaßnahmen erarbeitet (UV-Schutz-Bündnis 2017). ³⁸ Bezogen auf Gesundheitsberufe unterstützt der Bund unter anderem Aktivitäten der Deutschen Allianz Klimawandel und Gesundheit e.V. (KLUG) im Rahmen der Verbändeförderung des BMU, um Klimawandel und Anpassung unter anderem in nationalen Bildungs- und Prüfungskatalogen zu verankern.
4.13	Wirksamkeitsanalysen von gesundheitlichen Anpassungsmaßnahmen im Rahmen	Wissen (Forschung, Monitoring)	Bundesweite Erhebung, Wirksamkeitsanalyse und Evaluation von: (i) in der operativen Anwendung/Umsetzung befindlichen Handlungsempfehlungen zur Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit (Straff und Mücke 2017), (ii) geplanten oder bereits angewendeten Hitzeaktionsplänen, (iii) bereits in der operativen Anwendung befindlichen Hitzepräventionsmaßnahmen

³⁸ Hierbei handelt es sich um eine Forderung des UV-Schutz Bündnisses; die Maßnahme wird nicht vom UV-Schutz-Bündnis durchgeführt.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
	von Hitzeaktionsplänen		
4.14	Prüfung der Rahmenbedingungen für ein integriertes Gesundheits- und Umweltmonitoringssystem [...] (im Sinne von ONE HEALTH)	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Einrichtung eines integrierten Umwelt-Gesundheitsbeobachtungssystems auf Bundesebene auf Basis bestehender Strukturen, mit dem gesundheitsrelevante Umweltfaktoren beobachtet und gesundheitlichen Beeinträchtigungen zugeordnet werden können. Im Kontext einer gesundheitlichen Anpassung an den Klimawandel wären eine integrierte Datenerhebung und synergetische Analyse (zum Beispiel Pollen- und Allergiemonitoring), eine erhöhte Kontrolle während Hitzeperioden durch die Lebensmittelüberwachung und die Auswertung von Umwelt- und Mortalitätsdaten zu empfehlen.
4.15	Evaluierung bestehender Maßnahmen durchführen und ggf. verstetigen	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Evaluierung der Umsetzung und Wirksamkeit von Handlungsempfehlungen und Präventionsmaßnahmen (zum Beispiel Hitzewarnsystem) mit Formulierung von Empfehlungen für deren Aktualisierung und Weiterentwicklung (RKI/UBA 2013, 16). Evaluation der bestehenden und neu entwickelten Versorgungs- und Behandlungsstrategien bei Hitzeperioden (RKI/UBA 2013, 21). Evaluierung von Maßnahmen im Hinblick auf Verhaltensanpassungen der Bevölkerung und auch der Verhältnisse (RKI/UBA 2013, 16; Das UV-Schutz-Bündnis, 2017) Prüfung und Nutzung der vorhandenen Daten des Monitorings für die Evaluierung.
4.17-4.18	Durchführung/Förderung von Studien zu stadtplanerischen Anpassungsmaßnahmen und Maßnahmenengebieten	Wissen (Forschung, Monitoring); Technologie und natürliche Ressourcen	Analysen zur Überschreitung bestimmter Hitzewarnschwellen und kartographische Aufbereitung, um Hot Spots der Hitzebelastung zu ermitteln (BBSR). Modellierung dieser Belastung für Stadt- und Gebäudeplanung sowie Landschaftsarchitektur mithilfe von GIS-Programmen. Ermittlung von Hot Spots der Hitzebelastung durch Überlagerung räumlich eingegrenzter Gebiete der Hitzebelastung (Andauer, Intensität, Häufigkeit) und sensibler Stadtstrukturen (zum Beispiel Anteil Älterer, Einpersonenhaushalte, geringe Wohnfläche und Ausländeranteil).
4.26	Informationsmaterialien und -tools, die auf die vulnerablen Zielgruppen zugeschnitten sind	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Zielgruppengerechte Informationsmaterialien über die gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels und mögliche präventive und gesundheitsfördernde Maßnahmen. Im Fokus stehen besonders vulnerable Gruppen (zum Beispiel Kleinkinder, ältere oder vorerkrankte Personen) in Bezug auf Hitze-, UV- und lufthygienische Belastung sowie geeignete Präventivmaßnahmen gegen Gesundheitsschädlinge bei Aufenthalt im Freien.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
4.27	Anpassung der Informations- und Frühwarnsysteme und Ausweitung der Zielgruppe von Frühwarnsystemen	Wissen; Motivation und Akzeptanz	<p>Anpassung der Informationswege und -zustellungsformen, im Hinblick auf alle Zielgruppen (RKI/UBA, 16).</p> <p>Technische und organisatorische Voraussetzungen sollen geschaffen werden, sodass Warninformationen aus unterschiedlichen behördlichen Quellen harmonisiert und an möglichst viele Menschen verteilt werden können. Entsprechende Warnsysteme bestehen bereits und werden kontinuierlich weiterentwickelt.</p> <p>Etablierung und Weiterentwicklung von Warnsystemen auch für Kranken- und Pflegeeinrichtungen (BBSR 2016b, 80) und entsprechende Personengruppen (zum Beispiel Ärzte) (BSSR 2016, 49).</p> <p>Teilnahme am internationalen Austausch; Übernahme der Erfahrungen aus anderen Ländern, zum Beispiel Italien (UBA/IÖW 2013, 12).</p> <p>Integration von Hitze-, UV- und lufthygienischer Belastung sowie potenziellem Befall von Gesundheitsschädlingen beim Aufenthalt im Freien in entsprechenden Frühwarnsystemen.</p>

Während die im APA III verankerten Anpassungsoptionen insbesondere dem Bereich Wissen zuzuordnen sind, teilweise einhergehend mit Motivation-/Akzeptanz-fördernden Maßnahmen (Bewusstseinsbildung), wofür auch die Schaffung der rechtlichen Rahmenbedingungen und die Mobilisierung finanzieller Ressourcen eine nicht unwesentliche Rolle spielen, treten die Dimensionen Technologien und natürliche Ressourcen und Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen weniger in Erscheinung.

Weiterreichende Anpassung

Ausgehend von den im APA III festgehaltenen Maßnahmen und Instrumenten, die in die Anpassungskapazität gegenüber einer zunehmenden thermischen Belastung einfließen, und den dabei unterschiedlich stark ausgeprägten Anpassungsdimensionen, sind Möglichkeiten denkbar, die die Entwicklung hin zu einer weiterreichenden Anpassungsfähigkeit unterstützen könnten. (Diese sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst; wobei diese Darstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt).

Tabelle 49: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Hitzebelastung“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ³⁹	Charakteristika
Förderung der Erstellung von Hitzeaktionsplänen, inklusive Festlegung der Zuständigkeiten und einer zentralen Koordinierungsstelle mit Ausbau eines interdisziplinären Netzwerkes (Ragetti und Rösli 2017; Straff und Mücke 2017; Kuttler 2018; Ziello und	Wissen; Motivation und Akzeptanz; Rechtliche Rahmenbedingungen	Weitere Verbreitung und Nutzung von Hitzeaktionsplänen; Klare Zuständigkeitsregelung und Akteurs-Vernetzung mithilfe der Koordinierungsstelle	Kommunen (Erstellung der Pläne) Landes- und Bundesebene (Förderung der Planerstellung)	Die Umsetzung hängt von Akteuren auf kommunaler Ebene ab. Dort besteht eine Abhängigkeit von personellen Ressourcen.

³⁹ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ³⁹	Charakteristika
Matzarakis 2018; Mücke und Matzarakis 2019; WHO 2019; Grewe und Blättner 2020)	und politische Strategien; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen		lung und Einrichtung der Koordinierungsstellen)	
Maßnahmen zum Schutz besonders vulnerabler Gruppen (Ragettli und Röögli 2017; Straff und Mücke 2017; Balas et al. 2018; Ziele und Matzarakis 2018; Shumake-Guillemot 2020); zum Beispiel Ausbau der Maßnahmen zur Reduktion von Hitze in Innenräumen; Ausbau von Akutmaßnahmen (Straff und Mücke 2017)	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	Besonders vulnerable Personengruppen können durch gezielte Informationskampagnen und zum Beispiel Kontrollmechanismen für die Flüssigkeits- und Medikamentenaufnahme oder Aufenthaltsorte geschützt (kühle Orte) werden	Privathaushalte; Privatwirtschaft; Kommunale Ebene bei öffentlichen Gebäuden	Abhängig vom Wissen über und von der Erreichbarkeit vulnerabler Gruppen; schnelle Reaktionsketten sind erforderlich; Die Nutzung von Klimaanlagen wäre ggf. durch Kühlungseffekte durch bauliche Maßnahmen zu ersetzen (Bettgenhäuser et al. 2011; Stadtverwaltung der Landeshauptstadt Potsdam 2015; Reusswig et al. 2016).
Bundesweit flächendeckendes, aber regional spezifisches Mortalitäts- und Morbiditätsmonitoring ausbauen (Ragettli und Röögli 2017; Steul et al. 2019)	Wissen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Möglichkeit der genaueren Einschätzung der regionalen und bundesweiten Morbidität und Mortalität infolge von Hitzebelastung	Bundes-, Landes-, Kommunal-ebene	Erheblicher Aufwand für die Erhebung, Aufbereitung, Analyse, und Speicherung von Daten

Auf der Ebene des Wissens kommen etliche weiterreichende Maßnahmen in Frage, welche die Sensitivität und Exposition gegenüber klimawandelassoziierter stärkerer Hitzebelastung verringern können. Die Umsetzung und Verstetigung mehrerer dieser Optionen hängt neben der rechtlichen Rahmensetzung auch von der Verfügbarkeit personeller Ressourcen ab, zum Beispiel Monitoring, Ausbau und Koordinierung der Aktivitäten im Zusammenhang mit Hitzeaktionsplänen. Sowohl personeller als auch finanzieller Ressourcen bedarf es insbesondere in Gesundheits- und Umweltämtern.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 50: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung "Hitzebelastung"

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	<ul style="list-style-type: none"> - Werkzeuge für den klimaresilienten Stadtumbau (unter anderem Berücksichtigung der Hitze-Thematik) und Weiterentwicklung und Konkretisierung des Leitbilds „Schwammstadt“ (zum nachhaltigen Umgang mit Niederschlagswasser); die Speicherung von Niederschlagswasser und Anregung der Verdunstung dient unter anderem der Verbesserung des Mikroklimas, wodurch auch Hitze entgegengewirkt werden kann (APA III: 6.7 bzw. 6.5). - Insbesondere in größeren Städten stellen die Schaffung und der Erhalt von Frei- und Grünflächen, die Stadtbegrünung (zum Beispiel Baumpflanzung und -pflege, Dach- und Fassadenbegrünung), wodurch Verschattungs- und Kühlungseffekte sowohl für Innenräume als auch an öffentlichen Plätzen geschaffen werden sollen (Stock 2015), der Erhalt und die Neuanlage von Luftleitbahnen, die Nutzung „blauer“ Infrastrukturen und die Erhöhung/Senkung des Reflexionseffekts wesentliche Ansatzpunkte für den Umgang mit Hitzebelastungen dar (BBSR 2016) (APA III: 6.12).
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	<ul style="list-style-type: none"> - Weiterentwicklung bestehender Informationsangebote zum Beispiel zu Hitze, und Einbettung dieser in umfassende Risikokommunikationskonzepte: Zielgruppenspezifische Aufbereitung von Informationen und Verbreitung dieser auf unterschiedlichen Kanälen, anlassbezogen und kontinuierlich, zur Stärkung der Selbstschutzzfähigkeit der Bevölkerung, um die individuelle Betroffenheit durch unwetterbedingte Gefahren zu senken (APA III: 6.13); - Vorhaltung von medizinischem Material für Hitzewirkungen (zum Beispiel Hitzeschläge), engmaschige Begleitung von Einrichtungen, in denen vulnerable Gruppen leben oder sich regelmäßig aufhalten (zum Beispiel Seniorenheime), bei der hitzeangepassten Gebäudeumgestaltung; technische Neuerungen (zum Beispiel klimatisierte Rettungswagen) (Mücke und Matzarakis 2019)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk schätzte den zeitlichen Rahmen für Anpassungsprozesse bezogen auf die Klimawirkung „Hitzebelastung“ auf weniger als zehn Jahre ein (von der Umsetzung bis zum Eintreten der Wirksamkeit von Maßnahmen). Bei einzelnen Maßnahmen (insbesondere, wenn raumplanerische Prozesse eine Rolle spielen) können sich Anpassungsprozesse auch über mehrere Jahrzehnte erstrecken.

Tabelle 51: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung "Hitzebelastung"

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Akutmaßnahmen und Frühwarnsysteme - Bereitstellung von Informationsmaterialien für die Öffentlichkeit und (speziell) für bestimmte Bevölkerungsgruppen Betroffenheitsanalysen: Gebiete und Personengruppen - Forschung zu Extremereignissen - Erstellung und Umsetzung von Hitzeaktionsplänen - Weiter- und Fortbildungsmaßnahmen - Anpassung von Bildungs- und Lehrplänen - Vorbereitung von Gesundheits- und Sozialeinrichtungen - Wirksamkeitsanalysen und Evaluation von Maßnahmen

Zeithorizont	Anpassungsoption
	<ul style="list-style-type: none"> - Etablierung eines Gesundheits- und Umweltmonitoringsystems, Mortalitäts- und Morbiditätsmonitoring - Weiterentwicklung von Frühwarnsystemen - Staatliche Regeln zum Arbeitsschutz - Sonnenschutz und Hitzeschutz an Gebäuden (Fenster), Fassadenbegrünung (zur Beschattung der Fassade und damit Eindämmung der Innenraumerwärmung) und helle Farben an Außenfassaden (Reflexionseffekt) - Optimierung der Beschattung von Plätzen im öffentlichen Raum, in Außenbereichen an Einrichtungen des alltäglichen Lebens (Schulen, Kinderbetreuungseinrichtungen, Senioreneinrichtungen, Arbeitsstätten)
10-50 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Umsetzung regional- und stadtplanerischer Konzepte (einschließlich Beteiligungsprozesse, baulicher Ausführung, Etablierung von Maßnahmen in der Praxis, Evaluation von Maßnahmen)

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 52: „Hitzebelastung“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100	
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch		Pessimistisch
Wirksamkeit der Anpassung⁴⁰	gering-mittel	mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie aus der nachstehenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Wissen“, „Motivation und Akzeptanz“, „Finanzielle Ressourcen“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zu leisten.

Tabelle 53: „Hitzebelastung“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	2-3	1-2	2-3	2-3	2-3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

⁴⁰ Die Einschätzungen zur Wirksamkeit der Anpassung und zur Gewissheit der Aussagen beziehen sich jeweils auf sehr heterogene Maßnahmensets, die der Anpassung an „Hitzebelastung“ dienen, da alle relevanten Einzelmaßnahmen des APA III (beschlossene Maßnahmen) und die weiterreichenden Möglichkeiten der Anpassung jeweils in Gänze betrachtet wurden. Diese Heterogenität stellte eine Herausforderung bei der Einschätzung der Anpassungskapazität gegenüber dem Klimarisiko „Hitzebelastung“ dar.

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.2 Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft

Hintergrund und Stand der Forschung

„Eine Allergie ist eine spezifische immunologische Reaktion mit klinischen Symptomen“ (Traidl-Hoffmann 2018; S. 49). Sie beginnt mit der Sensibilisierung, das heißt, dass das Immunsystem einen zunächst harmlosen Umweltfaktor (Allergen) als schädlich einstuft und spezifische Antikörper ausbildet. Nun kann jeder weitere Kontakt mit dem Allergen zu Symptomen führen. Dies ist aber nicht zwingend der Fall, sodass nicht jede Sensibilisierung zu einer Erkrankung führt (Höflich 2016; Thamm et al. 2018; Traidl-Hoffmann 2018).

Allergien sind die am häufigsten auftretende chronische Erkrankung in Deutschland und Europa (Simoleit et al. 2016; Traidl-Hoffmann 2018) und damit eine relevante Frage der öffentlichen Gesundheit (Damialis et al. 2019). Die mit ihnen verbundenen körperlichen Beeinträchtigungen mindern die Lebensqualität der Betroffenen (Werchan et al. 2017). Sie führen außerdem zu einer verringerten Leistungsfähigkeit und in der Europäischen Union (EU) auf diesem Weg nach Schätzungen zu sozioökonomischen Schäden in Höhe von 55 bis 151 Milliarden Euro jährlich (Traidl-Hoffmann 2018).

In Deutschland wurde fast bei einem Drittel aller Erwachsenen mindestens eine Allergie ärztlich diagnostiziert (sogenannte Lebenszeit-Prävalenz; Langen et al. 2013). Häufigste Auslöser von Allergien sind Pollen (Werchan et al. 2017), die neben den Atemwegserkrankungen Heuschnupfen⁴¹ und Asthma auch das sogenannte orale Allergiesyndrom (OAS) auslösen können, das pollenassoziierte Nahrungsmittelallergien bezeichnet (Fachübergreifender Arbeitskreis „Bundesweites Pollenmonitoring“ 2019). Bei Erwachsenen liegt die Lebenszeit-Prävalenz für Heuschnupfen bei 14,8 Prozent und für Asthma bei 8,6 Prozent (Langen et al. 2013). In der Altersgruppe der Kinder und Jugendlichen erhielten elf Prozent schon einmal in ihrem Leben die ärztliche Diagnose Heuschnupfen und sechs Prozent die ärztliche Diagnose Asthma (Thamm et al. 2018). Die Zahlen der an Allergien Erkrankten haben sich in den letzten Jahren auf einem stabilen, aber hohen Niveau eingependelt (Langen et al. 2013; Thamm et al. 2018). Höher noch als die Zahl der erkrankten ist die Zahl der allergisch sensibilisierten Menschen. Eine Sensibilisierung lässt sich über den Nachweis von spezifischen Antikörpern im Blut bestimmen. In Deutschland sind 19,4 Prozent der Erwachsenen gegen Gräserpollen (Lieschgras und Roggen) und 19 Prozent gegen Baumpollen (Birke, Erle und Hasel) sensibilisiert (Haftenberger et al. 2013).

Die meisten Pollenallergien werden in Deutschland von frühblühenden Bäumen wie Hasel, Erle und Birke sowie von Gräsern und Kräutern ausgelöst (Endler 2013; Endler 2017; DAAB 2018; Höflich 2018). Der Klimawandel beeinflusst diese Pflanzen und damit den Beginn und die Dauer des Pollenflugs sowie die Pollenmenge und -allergenität; außerdem werden die Verbreitung und das Wachstum allergener Pflanzen und damit das Pollenspektrum von Klimafaktoren gesteuert (Höflich 2018; Traidl-Hoffmann 2018; Damialis et al. 2019; Fontana und Wüthrich 2019).

Die Pollensaison beginnt in Deutschland üblicherweise im Februar bis Mai mit Baum- und Strauchpollen. Im Frühsommer und Sommer (Mai bis Juli) dominieren die Gräser das Pollenspektrum und im Spätsommer und Frühherbst (August bis September) die Kräuter (Werchan et

⁴¹ Synonyme sind allergische Rhinitis, Heufieber, Pollinosis.

al. 2017; siehe auch „Gesamtdeutscher Pollenflugkalender nach Pollenflugdaten von 2011 bis 2016“⁴² der Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID 2018)).

Wann die Pollensaison beginnt und wie lang sie dauert, hängt neben dem Wetter auch von der Witterung (und der jahreszeitlichen Pflanzenentwicklung) ab. Einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Pflanzenentwicklung in unseren Breiten ist die Lufttemperatur, das heißt, milde Temperaturen fördern die Pflanzenentwicklung, niedrige hemmen sie (Endler 2017). Aber auch Tageslänge und Lichtintensität, das Wasserpotenzial im Boden und vielfältige chemische Einflüsse wirken auf die Entwicklungsprozesse der Pflanze (Larcher 2001). So können die Hasel und die nicht heimische Purpurerle, die gern als Straßenbaum gepflanzt wird, in sehr milden Wintern schon Ende Dezember zu blühen beginnen (Endler 2013; Endler 2017; DAAB 2018). In manchen Jahren fliegen die letzten Gräser- und Brennnesselpollen im November (DAAB 2018). So kann eine Pollensaison fast ohne Pause in die nächste übergehen, wodurch die gesundheitliche Belastung für Patientinnen und Patienten mit Mehrfachpollenallergien steigt. Sie haben in diesem Fall keine Erholungszeit mehr, in der keine Pollen fliegen.

Die Wahrscheinlichkeit für einen durchgehenden Pollenflug über das gesamte Jahr steigt mit dem Klimawandel. Bereits in den vergangenen Jahrzehnten zeigte sich infolge der beobachteten Klimaerwärmung eine Verfrühung der Pollensaison in Deutschland: Wie phänologische Beobachtungen zeigen, hat sich der Start der Hasel- und Erlenblüte zwischen 1961 und 2017 um bis zu 26 Tage verfrüht; auch der Beginn der Blüte von Birke und Gräsern hat sich im Zeitraum von 1991 bis 2017 im Mittel um ein bis eineinhalb Wochen nach vorne verschoben (Endler 2020). Insbesondere für Gräser und Kräuter wird neben dem früheren Beginn zudem eine Verlängerung der Pollensaison im Zuge des Klimawandels beobachtet (Kaminski und Glod 2010; Augustin et al. 2017). Dass auch künftig mit dem Klimawandel eine Verfrühung der Pollensaison einhergeht, zeigt zum Beispiel Endler (2013): Verglichen mit dem Zeitraum 1971 bis 2000 könnte sich die Birkenpollensaison ihren Berechnungen zufolge bis 2050 im Mittel um sechs Tage vorverlagern, die Gräserpollensaison im Mittel um vier Tage.

Der Temperaturanstieg führt auch zu einer Zunahme der Pollenmenge in der Luft (Kaminski und Glod 2010). Gleiches bewirken die gestiegene CO₂-Konzentration in der Luft und der damit verbundene „Düngeeffekt“ (Gömann et al. 2017; siehe Handlungsfeld „Landwirtschaft“). Dies zeigen Experimente in Klimakammern und Vergleiche von Stadt und Umland⁴³ (Augustin et al. 2017; Bergmann 2017). El Kelish et al. (2014) fanden zudem Hinweise auf eine höhere Allergenität von Ambrosiapollen bei zunehmender CO₂-Konzentration und Trockenstress.

Auch wenn die Schwere der Symptome von Allergikern nicht notwendigerweise mit der Anzahl der Pollen in der Luft korreliert ist (Bastl et al. 2014; Bousquet et al. 2017; Karatzas et al. 2018), gibt es doch einen Zusammenhang (Karatzas et al. 2018; Damialis et al. 2019). Allerdings müssen weitere Faktoren einbezogen werden. Luftschadstoffe wie Feinstaub, bodennahes Ozon und Stickstoffoxide etwa können Heuschnupfen-Symptome verstärken und allergisches Asthma hervorrufen (Bunz und Mücke 2017; Fontana und Wüthrich 2019; siehe 4.2.6). Zum einen reizen viele Luftschadstoffe Haut und Schleimhäute und fördern so ihre Empfindlichkeit (Traidl-Hoffmann 2018; Fontana und Wüthrich 2019). Zum anderen können Luftschadstoffe Veränderungen an Pollen bewirken: So können sie die Oberflächen von Pollen verändern und damit die Freisetzung allergenhaltiger Partikel daraus erleichtern und die Allergenität von Pollen erhöhen (Traidl-Hoffmann 2018). Darüber hinaus können Luftschadstoffe die Freisetzung von Allergenen

⁴² Siehe auch: <http://www.pollenstiftung.de/pollenvorhersage/pollenflug-kalender/>

⁴³ In Städten – insbesondere in Innenstädten – ist die CO₂-Konzentration in der Luft in der Regel höher als auf dem Land. Grund sind unter anderem die Abgase aus Verkehr und Industrie.

aus Pflanzen unabhängig von Pollen bewirken; das Hauptallergen von Birkenpollen etwa ist ein Protein, das auch als Stressprotein freigesetzt wird (Fontana und Wüthrich 2019).

Im Zuge des Klimawandels und zunehmender Extremwetterereignisse könnte zudem das Phänomen des Gewitterasthmas (englisch: thunderstorm-related asthma) klinisch bedeutsamer werden: Durch starke Winde können im Vorfeld eines Gewitters viele Pollen in höhere Luftschichten gelangen. Neben den Winden treten häufig Niederschläge in Form von Schauern auf, durch die Pollen aus höheren Luftschichten in bodennahe Schichten gelangen. In der Folge ist häufig ein sprunghafter Anstieg der Pollenkonzentration zu beobachten. Zusätzlich können infolge hoher Luftfeuchte Pollen in kleinere Fragmente zerplatzen und dadurch vermehrt Allergene in die Luft freisetzen. Diese Fragmente sind aufgrund ihrer geringen Größe (in der Literatur werden Größen von < 10 und < 5 Mikrometern angegeben) noch lungengängiger und können bei Pollenallergikerinnen und Pollenallergikern besonders schwere Symptome hervorrufen. (Marks und Bush 2007; D'Amato et al. 2008; D'Amato et al. 2015; Pampel 2018)

Neben einer sich verändernden Pollenlast (Konzentration der Pollen in der Atemluft) und verstärkten Symptomen verändert sich mit dem Klimawandel auch das Pollenspektrum (Höflich 2016). Die Vegetationszonen verschieben sich, sodass sich das Verbreitungsgebiet vieler Pflanzen in höhere Lagen und nach Norden verschiebt (siehe „Verschiebung von Anbaugebieten“ im Handlungsfeld „Landwirtschaft“, „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). Damit können sich wärmeadaptierte Pflanzenarten in Deutschland weiter ausbreiten. Auch könnte sich das Verbreitungsgebiet allergener Pflanzenarten von außerhalb nach Deutschland erweitern. Doch auch eingeschleppte Pflanzenarten, insbesondere wärmeliebende Pflanzen, können sich in Regionen etablieren, wo sie vorher nicht vorkamen (siehe „Ausbreitung invasiver Arten“ im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). Die hochallergene⁴⁴ Beifuß-Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) beispielsweise hat sich in manchen Regionen Deutschlands schon etabliert (Cunze et al. 2013). Sie blüht zwischen August und Oktober (Endler 2013) und hat damit das Potenzial, die Pollensaison zu verlängern (Augustin et al. 2017; Lake et al. 2017; UBA 2019b). Sowohl Cunze et al. (2013) als auch Lake et al. (2017) projizieren eine deutliche Zunahme der Lebensraumeignung für die Beifuß-Ambrosie in Deutschland in den kommenden Jahrzehnten. Lake et al. (2017) gehen davon aus, dass sich damit verbunden die Zahl der Sensibilisierten in Europa mehr als verdoppeln wird, von geschätzt 33 Millionen im Zeitraum 1986 bis 2005 auf 77 Millionen im Zeitraum 2041 bis 2060. In Deutschland könnte die Zahl der Sensibilisierten um 235 Prozent zunehmen (Lake et al. 2018). Das häufigere Vorkommen der Pflanze würde über eine Zunahme der Pollenlast zudem mit stärkeren Symptomen bei den Erkrankten einhergehen (Lake et al. 2017).

Auch andere wärmeliebende Pflanzen könnten in Deutschland an Bedeutung gewinnen. Das UBA beispielsweise hat im Rahmen des Projektes „Allergische Sensibilisierung gegen Pflanzen mit Klimawandel-assoziiertem Ausbreitungspotenzial“ (FKZ 3710 61 228) unter anderem die Sensibilisierung gegenüber Pollen von Olivenbäumen untersucht. Zwar sind Olivenbäume heute in Deutschland noch selten, doch waren bereits Sensibilisierungen bei einem Teil der Testpersonen festzustellen (die wahrscheinlich entweder bei Reisen oder durch Kreuzsensibilisierung zustande kamen; Höflich 2016).

Für die Betroffenen sind Kenntnisse der aktuellen Pollensaison und Pollenlast besonders wichtig, unter anderem, um ihre Medikation zu steuern. Der Deutschen Wetterdienst bietet eine täg-

⁴⁴ Ambrosia-Pollen zählen zu den aggressivsten Allergieauslösern, weil bereits zehn Pollenkörner pro Kubikmeter Luft ausreichen, um Symptome hervorzurufen (bei Gräsern sind es 15 Pollenkörner pro Kubikmeter Luft und bei Birken 30; Traidl-Hoffmann 2018).

lich aktualisierte Vorhersage über die zu erwartende Pollenbelastung an (Pollenflug-Gefahrenindex⁴⁵). Sein Newsletter zum Pollenflug ist der zweiterfolgreichste des Deutschen Wetterdienstes nach den Unwetterwarnungen (Endler 2017).

Grundlage der Operationalisierung

Die Pollensaison in Deutschland startet mit der Blüte von Hasel und Erle, beides Arten der Familie der Birkengewächse (Endler 2017; PID 2018). Der Beginn der Erlenblüte ist daher ein guter Indikator, um den Start der Pollensaison abzubilden, und wurde auch im Rahmen der vorliegenden Klimawirkungs- und Risikoanalyse für räumliche Aussagen herangezogen (Tabelle 54). Phänologische Beobachtungen zeigen, dass die Erle in vielen Regionen Deutschlands schon heute früher blüht und ihre Pollensaison länger andauert (DWD 2020; Endler 2020). Für den Nordwesten Deutschlands beispielsweise ergab die Analyse der täglichen Pollenmesswerte an den Stationen Delmenhorst, Hannover, Bad Lippspringe und Mönchengladbach der Jahre 1988 bis 2009, dass der Pollenflug inzwischen um 30 Tage früher einsetzt (Kaminski und Glod 2010).

Für die vorliegende Klimawirkungs- und Risikoanalyse wurde der Blühbeginn der Erle über ein Modell berechnet, das als Eingangsdaten die täglichen Lufttemperaturen nutzt. Dabei spielen sowohl die Wintertemperaturen als auch die Temperaturen im Frühjahr eine Rolle, denn Erlen brauchen (wie andere Bäume auch) im Winter einen gewissen Kältereiz („Chilling-Effekt“). Erst wenn dieser Kältereiz ausreichend lang wirksam sein konnte, bestimmen die nachfolgenden Temperaturen in ihrer Summe den Blühbeginn (Chuine 2000).

Das Modell selbst ist ein Temperatursummenmodell, wie es beispielsweise von Pauling et al. (2014) beschrieben und für verschiedene Baumarten in der Schweiz getestet wurde. Temperatursummenmodelle sind ein übliches Instrument, um phänologische Phasen zu errechnen (Pauling et al. 2014). Ab einem definierten Tag im Jahr summiert das Modell die entsprechenden Lufttemperaturen der einzelnen Tage auf, sobald diese über einem bestimmten Schwellenwert liegen. Ist die für die Erlenblüte erforderliche Temperatursumme erreicht, gilt dieser Tag als Tag des Blühbeginns. Welche Temperatursumme für den Blühbeginn erforderlich ist, wurde mithilfe phänologischer Beobachtungen oder Pollendaten vergangener Jahre ermittelt (Endler 2017).

Temperatursummenmodelle zur Bestimmung phänologischer Phasen von Bäumen werden schon seit mehreren Jahrzehnten verwendet und verfeinert (Chuine 2000). Zwar spielen für den einzelnen Baum auch standortspezifische Faktoren eine Rolle, die in allgemeinen Modellen nicht berücksichtigt werden können, doch für allgemeine Aussagen sind die Ergebnisse der Temperatursummenmodelle zuverlässig (Pauling et al. 2014). Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse bestätigen die schon beobachtbaren Folgen des Klimawandels. Gleichzeitig ist die Richtung der Entwicklung eindeutig, sodass von einer hohen Sicherheit der Ergebnisse ausgegangen werden kann. Bei der Interpretation berücksichtigt werden sollte jedoch, dass Erlenpollen mit dem Wind gegebenenfalls auch über weite Distanzen transportiert werden können (Pauling et al. 2014). Dies kann dazu führen, dass Allergiesymptome an einem Standort ausgelöst werden, an dem die lokalen Erlen noch gar nicht blühen.

Tabelle 54: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Blühbeginn der Erle	Tag des Blühbeginns der Erle im Jahr	GE-KL-07

Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

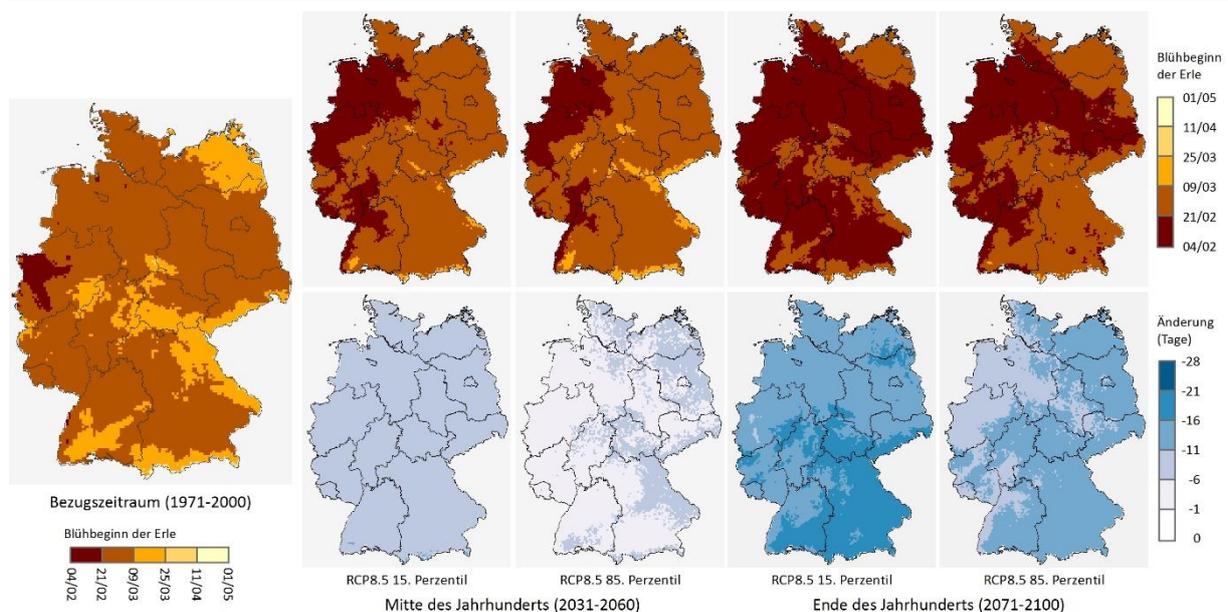
⁴⁵ Siehe auch: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/ Gefahrenindizespollen/ Gefahrenindexpollen.html>

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, "Konzept und Methodik")

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Im Bezugszeitraum 1971 bis 2000 blühte die Erle zuerst im Westen Deutschlands. Zwischen dem 45. und dem 55. Tag des Jahres – das heißt zwischen dem 14. und dem 24. Februar – begann im 30-jährigen Durchschnitt die Erlenblüte im Westen Niedersachsens, in der Westfälischen Bucht, an Niederrhein und Mosel und im Oberrheingraben. Besonders früh blühte die Erle am Niederrhein und in der Kölner Bucht. Bis Mitte März setzte die Erlenblüte dann in weiten Teilen der Bundesrepublik ein. Vergleichsweise spät setzten die Erlenblüte und damit die Pollensaison in den Höhenlagen des Harzes, des Erzgebirges, der Rhön, des Thüringer und des Frankenwaldes, des Bayerischen Waldes, des Schwarzwaldes und der Alpen ein. Hier blühte die Erle Ende März und teilweise noch später auf (Abbildung 20).

Abbildung 20: Tag des Blühbeginns der Erle im Jahr



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hinweis: Die größere Karte zeigt den Bezugszeitraum. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die entsprechenden Änderungswerte im Vergleich zum Bezugszeitraum. Dass die projizierten Änderungen beim 15. Perzentil größer sind als beim 85. Perzentil, liegt daran, dass die Perzentile für den vorliegenden Datensatz gerechnet wurden, in dem kleinere Werte eine frühere Blüte anzeigen. Diese wird verursacht von einer höheren Temperatur. Insofern steht das 15. Perzentil hier für den stärkeren Temperaturanstieg (also den oberen Rand der Temperaturentwicklung).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Dass die Erle im Westen der Bundesrepublik früher blüht als in der Mitte und im Osten, wird den Berechnungen nach auch in der Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) der Fall sein. Im pessimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) könnte sich der Blühbeginn in den oben genannten Regionen um rund fünf Tage nach vorn verschieben (Abbildung 20). Im größten Teil Deutschlands würde der Blühbeginn sogar acht bis zehn Tage früher einsetzen, sodass im Mittel der Beginn der Erlenblüte im Februar fast deutschlandweit üblich wäre. Mit einem bis zu elf Tagen früheren Einsetzen der Erlenblüte verschöbe sich die Pollensaison im pessimistischen Fall in den Alpen und den Mittelgebirgen besonders stark nach vorn. Insgesamt würde sich der Zeitpunkt des Blühbeginns in den einzelnen Regionen also annähern.

Im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) wären die Muster im Grunde ähnlich wie im pessimistischen Fall, die Entwicklung wäre aber weniger stark ausgeprägt. Im Westen Deutschlands würde sich der Blühbeginn der Erle drei bis vier Tage vorverlegen, im größten Teil Deutschlands fünf bis sieben Tage (Abbildung 20).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Der schon für die Mitte des Jahrhunderts erkennbare Trend setzt sich den Berechnungen zufolge bis zum Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) fort. Im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) würde die Erlenblüte im Westen Deutschlands, wo sie besonders früh im Jahr einsetzt, rund acht bis zehn Tage früher beginnen als im Bezugszeitraum (Abbildung 20). In weiten Teilen Deutschlands würde sie zehn bis zwölf Tage früher beginnen. In den Alpen, den Mittelgebirgen sowie im Osten der Nordostdeutschen Seenplatte würde die Erle rund zwei Wochen früher blühen. Infolgedessen würde die Erle fast deutschlandweit im Februar erblühen, in den Höhenlagen bis Mitte März.

Im pessimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) würde die Erlenblüte in Westdeutschland um zehn Tage und um 17 bis 22 Tage in den Alpen und vielen Mittelgebirgen früher beginnen (Abbildung 20). Sie begäbe am Niederrhein und im Oberrheingraben in der ersten Februarwoche. Bis Mitte Februar würde die Erle in ganz Deutschland mit Ausnahme der Gebirge und Nordostdeutschen Seenplatte blühen. Mit Ausnahme weniger Höhenlagen würde die Erle in den restlichen Teilen Deutschlands bis Ende Februar folgen (Abbildung 20). Im deutschlandweiten Mittel könnte die Pollensaison der Erle am Ende des Jahrhunderts verglichen mit dem Bezugszeitraum im 30-jährigen Mittel um rund zwei Wochen früher starten.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 55: „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“

- ▶ Infolge des Klimawandels beginnt die Pollensaison früher und dauert länger an. Es wird darüber hinaus erwartet, dass Pflanzen mehr und stärker allergene Pollen freisetzen.
- ▶ Durch die sich verschiebenden Vegetationszonen kann sich darüber hinaus das Pollenspektrum verschieben.
- ▶ Die Erle eröffnet zusammen mit der Hasel als Frühblüher die Pollensaison. Sie könnte am Ende des Jahrhunderts im deutschlandweiten Mittel um circa zwei Wochen früher blühen. Die Verschiebung des Blühbeginns wäre in den Höhenlagen besonders deutlich.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“

Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft sind zunächst durch die individuelle Sensibilisierung gegen solche Allergene bedingt. Darüber hinaus bestimmt das Problembewusstsein für Aeroallergen-bedingte Allergien – sowohl auf individueller beziehungsweise Betroffenen-Ebene als auch gesamtgesellschaftlich – die Sensitivität gegenüber dieser Klimawirkung. Stehen allergische Reaktionen zum Beispiel durch Pollen oder andere Aeroallergene stärker im Fokus der Aufmerksamkeit, lassen sich Vorkehrungs- oder Vermeidungsmaßnahmen umfassender, großflächiger und effektiver treffen. Als Beispiel – auf übergeordneter, also nicht individueller Ebene – lässt sich hier die Steuerung der Baumartenzusammensetzung anführen, das heißt der Verzicht auf beziehungsweise der verminderte Einsatz von besonders allergenen Bäumen (Birke, Erle, Hasel) an bestimmten Standorten, zum Beispiel als Straßenbäume (an verkehrsreichen Standorten in verdichteten Gebieten) oder in urbanen Parkanlagen (Bergmann und Straff 2015; Kandarr et al. 2015). Des Weiteren liegen Hinweise darauf vor, dass die Kombination aus Gewitterlage und Pollenkonzentration die Pollen-induzierte Allergie-Symptomatik verstärken kann (Buters et al. 2015b; Davies et al. 2018; D'Amato et al. 2020); der Kenntnisstand zur Verbreitung des Phänomens in Deutschland weist jedoch noch große Lücken auf.

Die räumliche Exposition gegenüber Aeroallergenen pflanzlicher Herkunft wird primär durch den lokalen Pflanzenbestand sowie durch Pollenferntransporte bestimmt. Ein weiterer entscheidender Einflussfaktor ist die Luftqualität. Da Luftverschmutzung (insbesondere durch Stickoxide, Feinstaub) das allergene Potenzial von Pollen erhöhen kann (Buters et al. 2015b; Katelaris und Beggs 2018), kann sie die Pollen-induzierte Symptomatik verstärken und außerdem zu neuen Sensibilisierungen führen (Singer et al. 2005; Ziello et al. 2012; Augustin und Andrees 2020). An verkehrsreichen (Wohn-)Standorten ist demnach von einer verstärkten Exposition gegenüber „allergeneren“ Pollen auszugehen (Bergmann et al. 2013). Im ländlichen Raum spielt darüber hinaus die Konzentration bodennahen Ozons eine große Rolle (D'Amato et al. 2020), da die Ozonwerte hier höher sein können und der Abbau bodennahen Ozons langsamer verläuft als in Städten (beziehungsweise an verkehrsreichen Standorten).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

An den genannten Faktoren wird teilweise bereits angesetzt, um den Umgang mit Allergien zu erleichtern. Grundsätzlich ist zwischen der Ebene des/der einzelnen Betroffenen und einer umfassenderen Ebene – bestimmte Akteursgruppen sowie gesamtgesellschaftlich – zu unterscheiden.

Anpassung des Einzelnen (zum Beispiel Vermeidung bestimmter Standorte bei Freizeitaktivitäten, Lüften zu entsprechenden Tageszeiten) ist möglich, wenn die Erkrankung in der medizinischen Fachwelt genau bekannt ist, eine exakte Diagnose gestellt wurde, und individuelle Besonderheiten berücksichtigt werden (Symptome unterscheiden sich je nach Individuum, Medikamenteneinnahme beeinflusst die Symptomatik). Als zentrales Instrument sowohl zur Information über die Pollenverbreitung als auch zur Symptombdokumentation kommen bereits Pollen-Apps zum Einsatz („Husteblume“, „Pollen-App“ und „GesundheitsWetter-App“). Dabei werden neben Pollenkonzentrationen und allergischen Beschwerden Parameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchte und Feinstaub, Stickstoffdioxid- und Ozonkonzentrationen berücksichtigt; wobei keine Auskunft darüber gegeben werden kann, wie viel Feinstaub/Stickstoffdioxid oder Ozon eingeatmet wird. Auch lässt sich nicht genau bestimmen, welcher Luftschadstoffkonzentration der/die Betroffene ausgesetzt ist, da diese je nach Standort sehr stark variieren können. Hinzu kommt, dass Messstandorte für Luftschadstoffe und für Pollen selten identisch sind⁴⁶ und dass sich auch die Exposition von Betroffenen gegenüber Pollen (oder anderen Allergenen) in Abhängigkeit von ihrer eigenen räumlichen Mobilität (häufig) ändern kann (Werchan et al. 2017). Wobei zumindest der zuletzt genannten Schwierigkeit mithilfe von (tragbaren) Geräten zur standortgenauen Bestimmung von Aeroallergenkonzentrationen („personal sampling“) begegnet werden kann (Levetin 2004; Werchan 2017; Weger et al. 2020). Aus den davor genannten Gründen ist jedoch der genaue Einfluss von Luftschadstoffen auf die Pollen-bedingte Symptomatik beim Patienten nur schwer bestimmbar.

Auf übergeordneter Ebene kann der Einsatz von Pollen-Apps zur genauen Aufzeichnung der Verbreitung allergischer Symptome beitragen (Pfaar et al. 2020). Außerdem könnten relativ genaue Informationen zur Symptomverbreitung/-belastung in Abhängigkeit von der Luftqualität zum Beispiel aus Daten zur Antihistaminika-Abgabe in Kombination mit Daten zur Luftqualität gewonnen werden (Grundström et al. 2017).

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung beziehungsweise Minderung von allergischen Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft (zum Beispiel Pollen) beitragen sollen:

⁴⁶ Die flächenhafte Verteilung von Luftschadstoffen wird mithilfe von Interpolationsverfahren auf der Grundlage von Messdaten zur Luftschadstoffkonzentration ermittelt (einschließlich der Messdaten zur Hintergrundbelastung mit Luftschadstoffen, deren Messung an bevölkerungsfernen Standorten erfolgt) (Sperk und Mücke 2009).

Tabelle 56: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
4.9	Sensibilisierungs-Monitoring im Rahmen des bundesweiten kontinuierlichen Gesundheitsmonitorings	Wissen (Forschung); Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Für die Abschätzung der Exposition gegenüber (sich ausbreitenden) Allergenquellen – infolge des Klimawandels ist mit neuen Allergenquellen und veränderten Allergengehalten zu rechnen – wird von den beim Menschen erfolgten Sensibilisierungen ausgegangen. Die Erfassung dessen erfolgt über die Bestimmung allergenspezifischer IgE-Antikörper im Blutserum/Nasensekret. Dazu bedarf es der wiederholten Untersuchung einer repräsentativen Bevölkerungsstichprobe (Untersuchungssurveys bei Kindern und Erwachsenen) (RKI). Ein Sensibilisierungsmonitoring ermöglicht aktuelle Einschätzungen und zeitliche Trendanalysen. Dabei können auch bundesweit repräsentative Daten zu den Sensibilisierungsprävalenzen bezüglich klimaassoziiertter Allergene vorgelegt werden.
4.10	Untersuchung der Wirkmechanismen neu auftretender Pollenallergene	Wissen (Forschung)	Beispiel <i>Ambrosia artemisiifolia</i> (weitere Beispiele: Götterbaum, Glaskraut)
4.14	Prüfung der Rahmenbedingungen für ein integriertes Gesundheits- und Umweltmonitoringssystem [...] (im Sinne von ONE HEALTH)	Wissen; Akzeptanz und Motivation (Bewusstseinsbildung, Aufklärung)	Einrichtung eines integrierten Umwelt-Gesundheitsbeobachtungssystems auf Bundesebene auf Basis bestehender Strukturen, mit dem gesundheitsrelevante Umweltfaktoren beobachtet und gesundheitlichen Beeinträchtigungen zugeordnet werden können. Im Kontext einer gesundheitlichen Anpassung an den Klimawandel wären eine integrierte Datenerhebung und synergistische Analyse, zum Beispiel Pollen- und Allergiemonitoring [...], eine erhöhte Kontrolle während Hitzeperioden durch die Lebensmittelüberwachung und die Auswertung von Umwelt- und Mortalitätsdaten zu empfehlen.
4.21	Erweiterung des Allergieinformationsdienstes (www.allergieinformationsdienst.de) am Helmholtz-Zentrum München	Wissen; Akzeptanz und Motivation (Aufklärung)	Ein Modul zum Thema Klimawandel und Allergien wird geprüft. Ziel ist die evidenzbasierte Bereitstellung von Informationen in allgemeinverständlicher Form.
4.28	Planungswerkzeuge und Informationsmaterialien zu klimaresilienten und nicht-allergenen Stadtbäumen für Kommunen	Wissen; Akzeptanz und Motivation (Information, Aufklärung)	Verbesserte Bereitstellung von Informationen für Kommunen zu den Wirkungen, Eigenschaften und Standortfaktoren von klimaresilienten, nicht-allergenen und standortangepassten Stadtbäumen im Kontext der Klimaanpassung.

Bei den im APA III hinterlegten Maßnahmen und Instrumenten zum Umgang mit allergischen Reaktionen durch Aeroallergene stechen Wissen und Akzeptanz und Motivation als zentrale Dimensionen der Anpassung hervor. Dies gilt für die individuelle Ebene (Betroffene) und die übergeordneten Ebenen, zum Beispiel eine ganze Akteursgruppe oder die gesamtgesellschaftliche Ebene, gleichermaßen. So ist umfangreiches Wissen seitens des einzelnen Betroffenen über die eigenen Allergie-bedingten Beschwerden für die individuelle Anpassung förderlich; gleichzeitig setzt dies auch Motivation voraus. Informationsbereitstellung und Aufklärung für Betroffene sind also höchst relevant, was sich in den beschlossenen Maßnahmen und Instrumenten im APA III auch widerspiegelt. Bewusstseinsstärkung ist darüber hinaus auch auf übergeordneter Ebene erforderlich, zum Beispiel in der kommunalen Bau- und Grünflächenplanung, sodass darauf hingewirkt werden kann, die Pflanzenauswahl für öffentliche Park-, Garten-, Grünanlagen Allergiker-gerecht zu gestalten. Neben den vorgesehenen Aufklärungsinstrumenten und -maßnahmen besteht in der Herausgabe von Pflanzempfehlungen für Räume des öffentlichen Lebens, unter anderem für Kommunen, bereits ein klimaanpassungsförderlicher Mechanismus. In deren regelmäßige Aktualisierung lassen sich Neuerungen im Sinne der Klimaanpassung basierend auf neuen Erkenntnissen zur Allergenität unter anderem von invasiven Arten leicht integrieren (LfULG 2017; Kotremba 2019; Ufer et al. 2019).

Weiterreichende Anpassung

Aufbauend auf den beschlossenen Maßnahmen und Instrumenten (gemäß APA III) zur Anpassung an allergische Reaktionen durch Aeroallergene unter Klimawandelbedingungen sind nachfolgend Möglichkeiten zusammengefasst, die zu einer weiterreichenden Anpassungskapazität beitragen würden.

Tabelle 57: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁴⁷	Charakteristika
Staatliche Verankerung der Aeroallergenmessung und: Etablierung eines hochauflösenden Monitorings; Beispiel: Elektronisches Polleninformati- onsnetzwerk Bayern ⁴⁸	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen; Technologie (und natürliche Ressourcen); Finanzielle Ressourcen	Potenziell höhere zeitliche und räumliche Genauigkeit der Pollenvorhersage, da elektronische Pollenmonitore eine automatisierte Pollenzählung und -charakterisierung ermöglichen (neue Pollenarten müssen in das System eingepflegt werden); Stundengenau und Standort-spezifische Informationen (zu Allergenen, in Kombination mit Lufttemperatur und Luftschadstoffen) ermöglichen eine individualisierte Prävention (einschließlich Medikation)	Bund; Länder	Höhere Einstufung der Allergie-Problematik auf der politischen Agenda; Schaffung einer Rechtsgrundlage (gesetzliche Vorschrift) zur Regelung des Monitorings (Kandarr et al. 2015)

⁴⁷ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

⁴⁸ Siehe auch: https://www.lgl.bayern.de/gesundheits/arbeitplatz_umwelt/biologische_umweltfaktoren/bioaerosole/epin.htm

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁴⁷	Charakteristika
Verbreitungskarte allergener Bäume	Wissen	Die Bundeswaldinventur ist eher grob. Der Ist-Zustand müsste genauer aufgezeichnet werden. Bisher ist lediglich bekannt, wo Bäume auftreten können.	(Angewandte) Forschung; Kommunen	Eine genaue Verbreitungskarte eignet sich für die Vorhersage und für die Gefährdungsabschätzung (zum Beispiel für Aufenthaltsorte, Wohnstandorte)
Konsequente Berücksichtigung und Förderung der Diversität bei (Neu)-Bepflanzungen im öffentlichen Raum	(Technologie und) Natürliche Ressourcen	Verringerung der Konzentration (besonders) allergener Pflanzenpollen	Kommunen	Die Diversifizierung der Siedlungsvegetation ist gleichzeitig von Bedeutung für den Umgang mit zunehmendem Hitze- und Trockenstress von Pflanzen

Der Ausbau der Aeroallergenmessung ist stark an die Schaffung einer verbindlichen (gesetzlichen) Vorschrift und an die Mobilisierung finanzieller Ressourcen geknüpft. Der Anpassung an die klimawandelbedingte Zunahme allergischer Reaktionen durch Aeroallergene zuträglich wäre insbesondere die technische Aufrüstung der Pollen- und Schimmelpilzsporenmessung, beispielsweise – wie in Bayern bereits an mehreren Standorten etabliert⁴⁹ – in Form von elektronischen Pollenmonitoren. Um bei der elektronischen Aeroallergenmessung die Präzision der Angaben sicherzustellen, sind Neuerungen, beispielsweise neue Pollenarten, kontinuierlich, das heißt sobald welche auftreten, ins System einzupflegen. Stunden- und Standort-genaue Messwerte ermöglichen nicht nur eine individualisierte Prävention, sondern tragen auch zur weiteren Forschung bei, welche die Grundlage für gezielte Anpassungsmaßnahmen schafft. Die staatliche finanzielle Beteiligung sowohl an der Aeroallergenmessung generell als auch an deren technischem Ausbau würde eine zusätzliche Stärkung der Anpassungskapazität gegenüber der klimawandelassoziierten Allergieverbreitung bedeuten.

Um den Kenntnisstand jedes Einzelnen zu vertiefen und damit vor allem die Handlungsbereitschaft zur Prävention und zur Anpassung zu stärken, ist eine verständliche Wissensvermittlung (unter anderem im Rahmen einer adressatenorientierten Wissenschaftskommunikation) unerlässlich. Zur Wissenserweiterung – sowohl auf individueller Ebene als auch gesamtgesellschaftlich – kann auch „Citizen Science“ wichtige Beiträge leisten, speziell für Messungen und die Erhebung von Daten im umweltmedizinischen Zusammenhang.

Die aufgezeigten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung können sowohl auf der individuellen Ebene als auch auf gesamtgesellschaftlicher Ebene an Grenzen stoßen. Eine Rolle spielt hier zum einen fehlende Handlungsbereitschaft trotz bereitgestellter Informationen (sowohl seitens der Betroffenen als auch der Nicht-Betroffenen und teilweise auch seitens des medizinischen Fachpersonals). Zum anderen kann beispielsweise die ungeminderte Freisetzung von Luftschadstoffen, welche die Allergiesymptomatik verstärkt, Aeroallergen-bezogene Anpassungsbemühungen untergraben.

⁴⁹ Siehe auch: https://www.lgl.bayern.de/gesundheits/Arbeitsplatz_Umwelt/biologische_Umweltfaktoren/bioaerosole/epin.htm

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 58: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	Vegetationsmanagement, Steuerung der Baumartenzusammensetzung über die Bauleitplanung

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Der zeitliche Horizont von Maßnahmen zum Umgang mit allergischen Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft wurde durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ auf weniger als zehn Jahre eingeschätzt.

Tabelle 59: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Pollentagebuch und Pollenvorhersage (Karatzas et al. 2014; PID 2018) - Angepasste Bepflanzungsgestaltung in privaten Haushalten/Gärten (zum Beispiel Allergiker-freundliche Gartengestaltung, insektenbestäubte statt windbestäubte Pflanzenarten) (Beggs 2010; DAAB 2016) Aufklärung, Bewusstseinsbildung - Umgestaltung von Parkanlagen und Anpflanzungen im öffentlichen Raum unter Berücksichtigung invasiver allergener Arten (zum Beispiel Ambrosia, möglicherweise Götterbaum, Glaskraut) - Aktive Bekämpfungsmaßnahmen (zum Beispiel bei <i>Ambrosia artemisiifolia</i>) (Buters et al. 2015a)
10-50 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Festlegung und Umsetzung von Richtlinien für die Vegetationsauswahl und Baumartenzusammensetzung, z. B. Allergiker-freundlich und gleichzeitig klimaangepasst/hitze- und trockenheitstolerant

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 60: „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100	
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch		Pessimistisch
Wirksamkeit der Anpassung⁵⁰	gering-mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	ja
Gewissheit	gering	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie aus der nachstehenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 61: „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	2	2-3	2-4	3-4	2-3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.3 Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen

Hintergrund und Stand der Forschung

Zunehmende Temperaturen können bestimmte Mikroorganismen und Algen in ihrem Wachstum begünstigen und ihre Verbreitung beeinflussen. Dabei gilt wie für andere Lebewesen, dass verschiedene Protozoen, Bakterienstämme, Algen- oder Pilzarten unterschiedliche Ansprüche an die Temperatur und die Feuchtigkeit stellen. Häufig aber befördert eine wärmere Umgebung das Wachstum beziehungsweise die Vermehrung; deshalb muss zum Beispiel für viele Lebensmittel eine geschlossene Kühlkette sichergestellt werden.

⁵⁰ Die Einschätzungen zur Wirksamkeit der Anpassung und zur Gewissheit der Aussagen beziehen sich jeweils auf heterogene Maßnahmensets, die der Anpassung an „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ dienen. Diese Heterogenität stellte eine Herausforderung bei der Einschätzung der Anpassungskapazität gegenüber dem Klimarisiko „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ dar.

In der Natur kommen Mikroorganismen natürlicherweise vor. Sie erfüllen viele wichtige Aufgaben in den ökosystemaren Kreisläufen. Nichtsdestotrotz gibt es natürlich vorkommende Mikroorganismen in der Umwelt, die die menschliche Gesundheit beeinträchtigen können. Zu den bekannteren wassergebundenen und potenziell gefährlichen Bakterien gehören die Cyanobakterien. Cyanobakterien können sowohl in Süßwasser (Seen und anderen Stillgewässern) als auch in Brackwasser (Ostsee) vorkommen und Toxine bilden, die beispielsweise die Leber schädigen oder auch die Atmung behindern (UBA 2015). Sie vermehren sich besonders in nährstoffreichen Gewässern und können sich bei warmen Temperaturen in Massen vermehren (sogenannte „Algenblüte“). In manchen Sommern kommt es in der Folge zur Sperrung von Badegewässern. Die Folgen des Klimawandels auf das Vorkommen von Cyanobakterien werden in den Handlungsfeldern „Küsten- und Meeresschutz“ und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ näher betrachtet (siehe „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ und „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“).

Auch bei anderen Mikroorganismen kann ein Einfluss durch den Klimawandel, sprich durch erhöhte Wassertemperaturen, angenommen werden. Naeglerien, eine Gattung freilebender Amöben, kommen in stofflich belasteten Seen und Fließgewässern bei Wassertemperaturen über 30 Grad Celsius vor. Diese Temperaturen treten in unseren Breiten nur selten natürlicherweise auf, können aber durch Wärmeeinleitungen zum Beispiel aus Kraftwerken erreicht werden (RKI 2015; Szewzyk und Selinka 2019). Eine Art, *Naegleria fowleri*, kann tödliche Hirnhautentzündung verursachen. In Frankreich gibt es daher bereits spezifische Regelungen für Warmwassereinleitungen in Gewässer (Szewzyk und Selinka 2019). In Deutschland gibt es bisher keine entsprechenden Maßnahmen. Doch sind auch noch keine Erkrankungen bekannt geworden.

Legionellen sind natürlich vorkommende Wasserbakterien, die sich bei Temperaturen um 36 Grad Celsius optimal vermehren. Sie treten daher bisher hauptsächlich in technischen Wassersystemen mit erwärmtem Wasser auf. Erreichen Flüsse künftig häufiger Wassertemperaturen über 30 Grad Celsius, könnten auch dort Vorkommen von Legionellen Relevanz erlangen. Im Gegensatz zum Infektionsweg bei Cyanobakterien und Naeglerien besteht hier nur ein geringer Zusammenhang zum Baden oder Schwimmen. Die Infektion mit Legionellen erfolgt über die Einatmung von legionellenhaltigen Aerosolen (RKI 2013). Ein Infektionsrisiko könnte sich daher zum Beispiel beim Versprühen belasteten Flusswassers für die Bewässerung von Feldern (Szewzyk und Selinka 2019) oder bei aerosolbildenden Wasserattraktionen in Badegewässern ergeben.

Beispielhaft für Mikroorganismen, deren Verbreitung und Vorkommen klimawandelbeeinflusst sind und von denen eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit ausgeht, wird hier die Bakteriengattung *Vibrio* näher betrachtet. Vibrionen kommen natürlicherweise in Brack- und Meerwasser vor (Baker-Austin et al. 2017; NLGA 2018), auch in Nord- und Ostsee. Sie sind insbesondere als Auslöser der Cholera⁵¹ bekannt, Cholera-toxin-tragende *V. cholerae* kommen in europäischen Gewässern jedoch nicht vor. Daher sind im Folgenden immer Nicht-Cholera-*Vibrio*-Infektionen gemeint. Während die echte Cholera in Deutschland nur als reiseassoziierte Erkrankung vorkommt, haben Infektionen mit anderen Vibrionen als den Erregern der Cholera durchaus eine Bedeutung für die Gesundheit in Deutschland. Die bisherigen unsystematischen Erkenntnisse zum Auftreten dieser „Nicht-Cholera-Vibriosen“ deuten an, dass mit einer Klimaerwärmung und Verlängerung der saisonalen Warmwasserphasen an deutschen Küsten bei gleichzeitig alternder Bevölkerung und damit einem größeren Anteil vulnerabler Personen in der Bevölkerung mit einer steigenden Bedeutung dieser Infektionen zu rechnen ist.

⁵¹ Cholera gehört zu den *Vibrio*-Infektionen; verursacht von den Serotypen *Vibrio cholerae* O1 und *Vibrio cholerae* O139. Die genannten Serotypen der *Vibrio*-Art *V. cholerae* kommen in Nord- und Ostsee nicht vor.

Es gibt zwei Wege, über die Vibrionen in den menschlichen Körper eindringen und Infektionen auslösen können: beim Verzehr roher Meeresfrüchte und über Kontakt von offenen Wunden mit Brack- oder Meerwasser. Im ersten Fall kann es zu schweren Durchfallerkrankungen und Blutvergiftungen (also den ganzen Körper betreffende Infektionen, auch: Sepsis) kommen. Im zweiten Fall sind schwere Wundinfektionen und Sepsis möglich. Dabei können mitunter tödliche Erkrankungen auftreten. Für beide Infektionswege gilt, dass Menschen mit einem geschwächten Immunsystem oder mit Grunderkrankungen wie einem Leberleiden, Alkoholabhängigkeit, Diabetes oder HIV besonders gefährdet sind. Im Fall von Wundinfektionen kann eine Amputation des betroffenen Körperteils notwendig sein, um die Infektion zu begrenzen, wenn nicht innerhalb von wenigen Stunden eine Behandlung mit einem passenden Antibiotikum eingeleitet wird. Der rasante Verlauf der Erkrankungen hängt auch damit zusammen, dass Vibrionen sich extrem schnell vermehren. Studien zeigten, dass die Verdopplungszeit von *V. parahaemolyticus* und anderer *Vibrio*-Arten unter optimalen Bedingungen acht bis neun Minuten beträgt (Baker-Austin et al. 2017). Es gibt nur wenig bekannte Bakterien, die sich ähnlich schnell reproduzieren können.

Die Fallzahlen für Infektionen mit Vibrionen in Deutschland sind bisher vergleichsweise gering, trotz der zahlreichen Badegäste, die jeden Sommer Nord- und Ostsee besuchen. Vibrioneninfektionen traten bisher nicht jedes Jahr, sondern nur in besonders heißen Sommern auf. Im Jahr 1994 wurde in Deutschland die erste Infektion mit *Vibrio vulnificus* berichtet, bis 2013 waren es dann insgesamt 13 Wundinfektionen und fünf Todesfälle. In den letzten Jahren mit heißen Sommern kam es zu höheren Fallzahlen (bis circa 20). Dem Robert Koch-Institut (RKI) wurde seit 2002 jährlich eine Größenordnung von null bis 20 Fällen an deutschen Küsten bekannt. Die Fälle traten vor allem in den wärmeren Sommern 2003, 2006, 2010 und 2018 auf (RKI 2019). Jedoch waren *Vibrio*-Infektionen (außer der klassischen Cholera) in Deutschland bislang nicht meldepflichtig, und sie werden (auch aufgrund der geringen Infektionshäufigkeit) nicht immer erkannt, sodass von einer Dunkelziffer auszugehen ist (Szewzyk und Selinka 2019). Eine Meldepflicht trat im März 2020 in Kraft.

Es ist in Deutschland bisher kein Fall bekannt geworden, in dem sich eine *Vibrio*-Infektion auf den Verzehr von rohen Meeresfrüchten aus Nord- oder Ostsee zurückführen ließ. Für Florida, USA, wo die Fallzahlen von *Vibrio*-Infektionen auch aufgrund der höheren Wassertemperaturen deutlich höher sind, gibt es statistische Auswertungen zu den verschiedenen Infektionswegen. Hlady und Klontz (1996) haben die in Florida gemeldeten *Vibrio*-Infektionen der Jahre 1981 bis 1993 ausgewertet, Weis et al. (2011) jene der Jahre 1998 bis 2007. Im Folgenden werden einige zentrale Ergebnisse dieser Studien aufgezeigt:

- ▶ Hlady und Klontz (1996) werteten 690 Fälle von *Vibrio*-Infektionen aus. 51 Prozent davon gingen mit Magen-Darm-Katarrh (Gastroenteritis) einher, 24 Prozent führten zu Wundinfektionen und 17 Prozent zu Sepsis. Tödlich endeten ein Prozent der Gastroenteritis-Fälle, fünf Prozent der Wundinfektions- und 44 Prozent der Sepsis-Fälle. Vorerkrankungen bestanden bei 22 Prozent der Gastroenteritis-Patientinnen und -Patienten, 20 Prozent der Infizierten mit Wundinfektionen und 73 Prozent der Infizierten mit Sepsis. Rund 68 Prozent der Erkrankungen mit Gastroenteritis und 83 Prozent der Sepsis-Fälle konnten auf das Verspeisen von rohen Austern zurückgeführt werden.
- ▶ Weis et al. (2011) berichten über 834 Infektionen bei 825 Personen. Rund 45 Prozent der Infektionen führten zu Wundinfektionen, 42 Prozent zu Gastroenteritis und fünf Prozent zu Sepsis. In dieser Studie konnten 26,4 Prozent der Infektionen auf den Verzehr roher Austern zurückgeführt werden, 11,5 Prozent auf den Verzehr anderer Meeresfrüchte. 37,5 Prozent der Erkrankungen waren auf den Kontakt mit Meerwasser zurückzuführen, bei 24,6 Prozent war der Infektionsweg nicht bekannt. Rund 10 Prozent der betrachteten Fälle verliefen tödlich.

Die Infektionen, die in den Studien ausgewertet wurden, wurden von einem breiten Spektrum verschiedener *Vibrio*-Arten verursacht. Weltweit gibt es über 100 *Vibrio*-Arten, etwa ein Dutzend davon können beim Menschen Infektionen hervorrufen (Baker-Austin et al. 2017). Weis et al. (2011) haben auch Zahlen zu einzelnen *Vibrio*-Arten veröffentlicht, unter anderem zur auch in der Ostsee verbreiteten Art *Vibrio vulnificus*. Rund die Hälfte der Infektionen mit *V. vulnificus* (45,3 Prozent) erfolgte über den Kontakt von offenen Wunden mit Seewasser (Weis et al. 2011), seltener auch durch Verletzungen im Zusammenhang mit dem Verzehr von rohem Fisch oder Meeresfrüchten.

Die bedeutendsten *Vibrio*-Arten, die in Nord- und Ostsee vorkommen, sind *Vibrio vulnificus*, *Vibrio parahaemolyticus* und *Vibrio cholerae non-O1/non-O139*. *V. parahaemolyticus* ist vergleichsweise tolerant gegenüber hohen und niedrigen Salinitätswerten (Wesp und Reifferscheid 2019). Die Salinität beschreibt den Salzgehalt des Wassers und wird hier und in den folgenden Abschnitten in PSU⁵² angegeben. Besonders hohe Abundanzen dieses Bakteriums waren im Rahmen der Studie „Entwicklung eines Frühwarn- und Informationssystems für das Auftreten von Vibrionen in Küstenbadegewässern“⁵³, für die an der Nordsee Proben im den Ästuarbereichen von Elbe, Weser und Ems genommen wurden, bei Salinitätswerten von neun bis elf zu beobachten (Wesp und Reifferscheid 2019). Dass aber auch an anderen Küstenabschnitten der Nordsee Vibrionen vorkommen, zeigen Arbeiten, die im Rahmen von KLIWAS⁵⁴ (Projekt 3.04) erfolgten: An zehn Stationen entlang der niedersächsischen Nordseeküste wurden von September 2009 bis Dezember 2011 Wasser- und Sedimentproben genommen. An jeder der Stationen war *V. parahaemolyticus* nachweisbar, auch dort, wo die Salinität des Wassers > 30 war (Brennholt et al. 2014). Das Bakterium wird vor allem mit lebensmittelassoziierten Infektionen in Verbindung gebracht.

Gesundheitlich bedeutender ist in Deutschland *V. vulnificus* (Szewzyk und Selinka 2019). Diese *Vibrio*-Art ist weniger tolerant gegenüber hohen Salinitätswerten und kommt daher insbesondere im brackigen Ostseewasser, aber auch in den Ästuarbereichen von Elbe, Weser und Ems in der Nordsee vor. Wesp und Reifferscheid (2019) berichteten von hohen Abundanzen bei Salinitätswerten von drei bis acht. Ähnliche Ansprüche wie *V. vulnificus* hat *V. cholerae*. Auch wenn viele Küstenabschnitte der Nordsee aufgrund ihres hohen Salzgehalts für dieses Bakterium als Habitat eher ungeeignet sind, ist ein Vorkommen von *V. vulnificus* (und *V. cholerae*) außerhalb der Ästuarare nicht ausgeschlossen. So ist durch Brennholt et al. (2014) ein zeitweises Vorkommen am Borkumer Strand (Salinität: 30) dokumentiert, das wahrscheinlich auf eine Verdriftung aus dem Ems-Ästuar zurückzuführen ist und zeigt, dass *V. vulnificus* zeitweise auch weit höhere Salinitäten tolerieren kann. *V. vulnificus* kann wie *V. parahaemolyticus* schwere lebensmittelassoziierte Infektionen hervorrufen. Baker-Austin et al. (2017) schreiben, dass 95 Prozent aller tödlichen Infektionen in den USA, die mit dem Verzehr von Meeresfrüchten zusammenhängen, von diesem Bakterium verursacht wurden. *V. vulnificus* spielt in Deutschland aber auch die bedeutendste Rolle bei den durch Vibrionen hervorgerufenen Wundinfektionen (Szewzyk und Selinka 2019).

Vibrionen sind ganzjährig im Meerwasser enthalten. Sie überwintern im Sediment oder in Fischen (BÄK und KBV 2018). Bei einer bestimmten Wassertemperatur (im Falle von *V. vulnificus*

⁵² PSU = ‚Practical Salinity Units‘: eine dimensionslose Skala zur Abbildung des Salzgehalts von Meerwasser (1 PSU \approx 1 g/kg \approx 1 ‰).

⁵³ FKZ 3716 62 203 0, im Auftrag des UBA

⁵⁴ KLIWAS („Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen“) war ein Ressortforschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI); www.kliwas.de.

beispielsweise bei rund 14 Grad Celsius) werden sie aktiviert⁵⁵ und können sich vermehren. Vibrionen der Spezies *V. parahaemolyticus* weisen bereits ab etwa 15 Grad Celsius eine hohe Abundanz auf, bei *V. vulnificus* und *V. cholerae* wurden ab einer Wassertemperatur von 18 bis 20 Grad Celsius hohe Abundanzen beobachtet (Baker-Austin et al. 2013; Wesp und Reifferscheid 2019), wobei für die Ostsee beobachtet wurde, dass ein Vorkommen aktiver *V. vulnificus*-Bakterien im Sediment schon bei deutlich niedrigeren Temperaturen wahrscheinlich ist (so liegt die Auftretenswahrscheinlichkeit von *V. vulnificus* im Sediment bei einer Wassertemperatur von fünf Grad Celsius bei etwa 20 Prozent; Brennholt et al. 2014). *Vibrio*-Infektionen weisen damit eine deutliche Saisonalität auf (Hlady und Klontz 1996; Weis et al. 2011). Wenn die Bakterien im Sommer aktiviert wurden, können sie bis in den Herbst hinein aktiv bleiben. Ob es einen Schwellenwert gibt, ab dem ein besonderes Infektionsrisiko besteht oder ob dieses von Wechselwirkungen verschiedener Einflussfaktoren abhängt, ist gegenwärtig noch Gegenstand der Forschung. Noch ist zudem das Pathogenitätspotenzial von Vibrionen im Ruhe- oder VBNC-Zustand (viable but non-culturable = lebend, aber nicht kultivierbar) nicht bekannt (Sun et al. 2008; Ramamurthy et al. 2014; Wesp und Reifferscheid 2019). Hinzu kommt, dass die Zahl der Badenden und damit der potenziell Betroffenen im Sommer um ein Vielfaches höher ist als im Winter.

Es muss davon ausgegangen werden, dass durch die zunehmend heißen Sommer und den damit verbundenen Anstieg der Meerestemperaturen die Abundanz der Vibrionen in Nord- und Ostsee zunimmt. Die Jahresmitteltemperatur des Oberflächenwassers in der deutschen Nord- und Ostsee könnte bis zum Ende des Jahrhunderts um rund drei Grad Celsius steigen (50. Perzentil des RCP8.5; siehe „Meerestemperatur und Eisbedeckung“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meereschutz“). Wenn früher im Jahr entsprechende Wassertemperaturen erreicht werden, ist die Periode, in der sich die Vibrionen vermehren können, länger. Sie vermehren sich in der Folge stärker. Eine Begrenzung ist dabei nicht abzusehen. Außerdem können sich die aktiven Vibrionen mit den steigenden Wassertemperaturen von Nord- und Ostsee räumlich weiterverbreiten. Im Jahr 2014, das in Schweden und Finnland extrem heiß war und mit hohen Wassertemperaturen einherging, wurden in beiden Ländern ungewöhnlich hohe Zahlen von *Vibrio*-Infektionen registriert, bis hinauf auf 65 Grad nördlicher Breite (rund 160 Kilometer vom Nordpolarkreis entfernt; Baker-Austin et al. 2016). Der Lancet Countdown⁵⁶ 2018 empfiehlt daher ausdrücklich für die Ostsee-Anrainer, *Vibrio*-Infektionen meldepflichtig zu machen und ein pan-europäisches *Vibrio*-Netzwerk zu gründen. Begründet wird diese Empfehlung damit, dass der prozentuale Anteil der Ostsee-Küstenregionen, die die Voraussetzungen für *Vibrio*-Infektionen erfüllen, in den 2010er-Jahren verglichen mit 1980 um 24 Prozent zugenommen hat. Zudem hat sich die Zahl der Tage im Jahr, an denen Infektionen möglich sind, weil die Vibrionen aktiviert wurden, fast verdoppelt (Rossinot 2018). Verschiedene Autoren haben zudem Projektionen der potenziellen Verbreitung von Vibrionen in Zukunft veröffentlicht (beispielsweise EEA 2017). Wo es aktuell günstige Wachstumsbedingungen für Vibrionen gibt, zeigt der *Vibrio Map Viewer* des Europäischen Zentrums für die Prävention und die Kontrolle von Krankheiten (englisch: European Centre for Disease Prevention and Control, ECDC) (ECDC 2005 - 2019; E3 Network 2014).

Baker-Austin et al. (2017) gehen sogar noch einen Schritt weiter: Aufgrund der hohen Reproduktionsrate von Vibrionen reagieren diese besonders schnell auf Veränderungen ihrer Lebensumwelt und sind besonders anpassungsfähig. Die Autoren empfehlen daher, Vibrionen als Barometer für den Klimawandel zu verstehen.

⁵⁵ Vibrionen, die „aktiv“ sind, können auf selektiven Nährmedien wachstumsfähige Kolonien ausbilden. Sie können dann mit kultivierungsabhängigen Methoden nachgewiesen werden. Nicht-aktive Vibrionen befinden sich im sogenannten VBNC-Zustand (viable but non-culturable = lebend, aber nicht kultivierbar).

⁵⁶ Der Lancet Countdown ist eine Veröffentlichung, die sich mit den Folgen des Klimawandels für die menschliche Gesundheit beschäftigt und von 27 Forschungs- und zwischenstaatlichen Organisationen veröffentlicht wird.

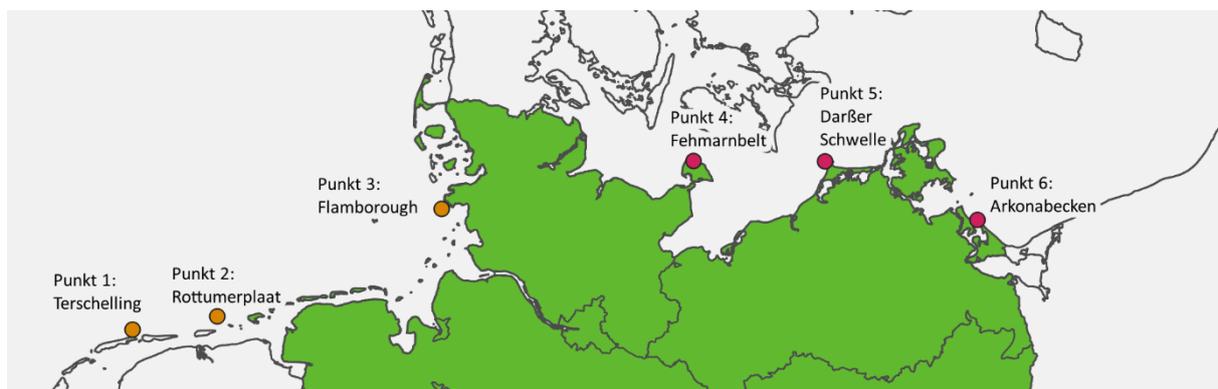
Im Rahmen von KLIWAS wurden mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Vorkommen und die Abundanz von Vibrionen in der deutschen Nord- und Ostsee untersucht. Basierend auf dem SRES-Szenario A1B wurde im Rahmen der KLIWAS-Projekte 1.03 und 2.01 errechnet, dass die Erwärmung des Meerwassers dazu führen könnte, dass sich der Zeitraum im Jahr mit Wasseroberflächentemperaturen über 17 Grad Celsius (hier als Schwellenwert für das Vorkommen potenziell humanpathogener Vibrionen verwendet) deutlich verlängert (Brennholt et al. 2014; Bülow et al. 2014a; Bülow et al. 2014b). In der Nordsee ist die Erwärmung in den Ästuaren besonders ausgeprägt. Hier könnte es in naher Zukunft (2021 bis 2050) bereits 3,5 bis 4,5 Monate im Jahr mit Wassertemperaturen über 17 Grad Celsius geben, in der Referenzperiode (1970 bis 1999) waren es zwei bis drei Monate. Auch im restlichen Wattenmeer könnte sich die Zeit im Jahr verlängern, in der das Wasser diese Temperaturen erreicht. Für die Ostsee wurde eine besonders ausgeprägte Erwärmung im Greifswalder Bodden modelliert. Außerdem könnten vor allem höhere Abflüsse in den Fließgewässern dazu führen, dass sowohl im Ems-Ästuar als auch im Weser-Ästuar die Brackwasserzone aus dem Ästuar „herausgeschoben“ wird (siehe KLIWAS-Projekte 2.04 und 3.02). Damit verbunden könnte insbesondere *V. vulnificus* neue Habitate in der Nordsee besiedeln. (Brennholt et al. 2014)

Von den Behörden des Behördennetzwerks forscht aktuell die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) zu Vibrionen in Badegewässern („Entwicklung eines Frühwarn- und Informationssystems für das Auftreten von Vibrionen in Küstenbadegewässern“, FKZ: 3716 62 203 0). Ziel ist es auch, ein Frühwarnsystem für Badende und Ärzte zu erarbeiten, damit im Falle von Infektionen eine frühe Erkennung und Behandlung möglich sind (Szewzyk und Selinka 2019). Im Rahmen des Vorhabens „Vibrio-Infektionen durch Lebensmittel und Meerwasser in Zeiten des Klimawandels (VibrioNet)“ haben sich das RKI und das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) im Verbund mit weiteren Partnern in den Jahren 2010 bis 2014 dem Thema gewidmet.

Grundlage der Operationalisierung

Abgebildet wird der Beginn der gesundheitlich relevanten Aktivität des Bakteriums *Vibrio vulnificus* an drei Punkten in der Ostsee (Abbildung 21).

Abbildung 21: Lage der Punkte, zu denen für die Operationalisierung der Klimawirkung „Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“ Daten ausgewertet wurden



Datengrundlage: SMHI, bereitgestellt vom BSH; GeoBasis-DE / BKG 2014 und Europäische Umweltagentur (EEA)

Die ockerfarbenen Punkte 1, 2 und 3 in der Nordsee erreichen den hier abgefragten Schwellenwert für die Salinität zu keinem der betrachteten Zeitpunkte und werden im Folgenden daher nicht weiter dargestellt.

Dass die Klimawirkung nicht flächendeckend für Nord- und Ostsee abgebildet wird, liegt darin begründet, dass das Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), das die hier verwendeten Daten zu Wassertemperatur und -salzgehalt berechnet hat (Dieterich et al. 2019), die für diese Klimawirkung benötigten zeitlich hochaufgelösten (täglichen) Werte der Projektionen aufgrund der Datenmenge nur für ausgewählte Punkte vorhält.

Die hier verwendeten Daten zur Wassertemperatur an der Meeresoberfläche und zum Salzgehalt wurden mit dem gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modell RCA-4/NEMO berechnet. Insgesamt gab es fünf Läufe dieses Regionalmodells mit unterschiedlichen Globalmodellen.

Um den Zeitpunkt des Beginns der relevanten Vibrionen-Aktivität abzubilden, wurde für jedes Jahr der drei betrachteten Zeiträume (Bezugszeitraum, Mitte und Ende des Jahrhunderts) pro Lauf der erste Tag im Jahr bestimmt, an dem das Oberflächenwasser eine Temperatur von mindestens 19 Grad Celsius und eine Salinität $< 25^{57}$ hat (Tabelle 62). Die genannten Schwellenwerte für Temperatur und Salinität sind an den Arbeiten von Huehn et al. (2014), Baker-Austin et al. (2013) und Heng et al. (2017) angelehnt.

Pro Zeitraum wurde anschließend für jeden Lauf der mittlere Tag im Jahr bestimmt, an dem diese Bedingungen erstmals erfüllt waren. Anschließend wurde je Zeitraum der Median über alle fünf Läufe ermittelt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass nicht für jedes Jahr und jeden Lauf die Schwellenwerte von Wassertemperatur und Salinität erreicht werden. Für die Interpretation der Daten ist es daher von Bedeutung, bei wie vielen Modellläufen pro Jahr *Vibrio*-Aktivität entsprechend des gewählten Indikators einsetzt.

Wie oben beschrieben kommt *V. vulnificus* vor allem in Brackwasser vor. In der Nordsee sind die Bakterien im Wattenmeer und in den Mündungsbereichen großer Flüsse zu finden (Huehn et al. 2014). Durch die grobe räumliche Auflösung der Modelle (circa vier mal vier Kilometer) bilden sich vor allem die Ästuarie aber nicht hinreichend in den Daten ab. Zudem befinden sich zwei der drei Punkte in der Nordsee nicht in unmittelbarer Nähe zur Festlandküste. So zeigte sich, dass die in Abbildung 21 dargestellten Punkte in der Nordsee den hier definierten Schwellenwert der Salinität zu keinem Zeitpunkt erreichen. Im Folgenden sind daher nur Ergebnisse zur Ostsee dargestellt.

Unsicherheiten entstehen bei dieser Klimawirkung dadurch, dass die einzelnen Modellläufe große Spannbreiten aufweisen, insbesondere beim Salzgehalt an der Meeresoberfläche. Abbildung 22 zeigt beispielhaft für die Punkte ‚Darßer Schwelle‘ und ‚Arkonabecken‘ die für Einzeljahre geplotteten Daten. Die y-Achse zeigt den Tag im Jahr, an dem erstmals die kombinierten Schwellenwerte erreicht werden. Bereits die Messdaten für die Bezugsperiode zeigen, dass dieser Zeitpunkt von Jahr zu Jahr sehr schwankt. Dies ist auch bei den Projektionen der Fall. Hinzu kommt, dass die Spannbreite der verschiedenen Modellläufe für die einzelnen Jahre recht groß ist. Sie wird durch die grünen Säulen in den Diagrammen dargestellt. Doch trotz dieser Unsicherheiten lässt sich bereits in dieser Abbildung für beide Punkte ein Entwicklungstrend ablesen.

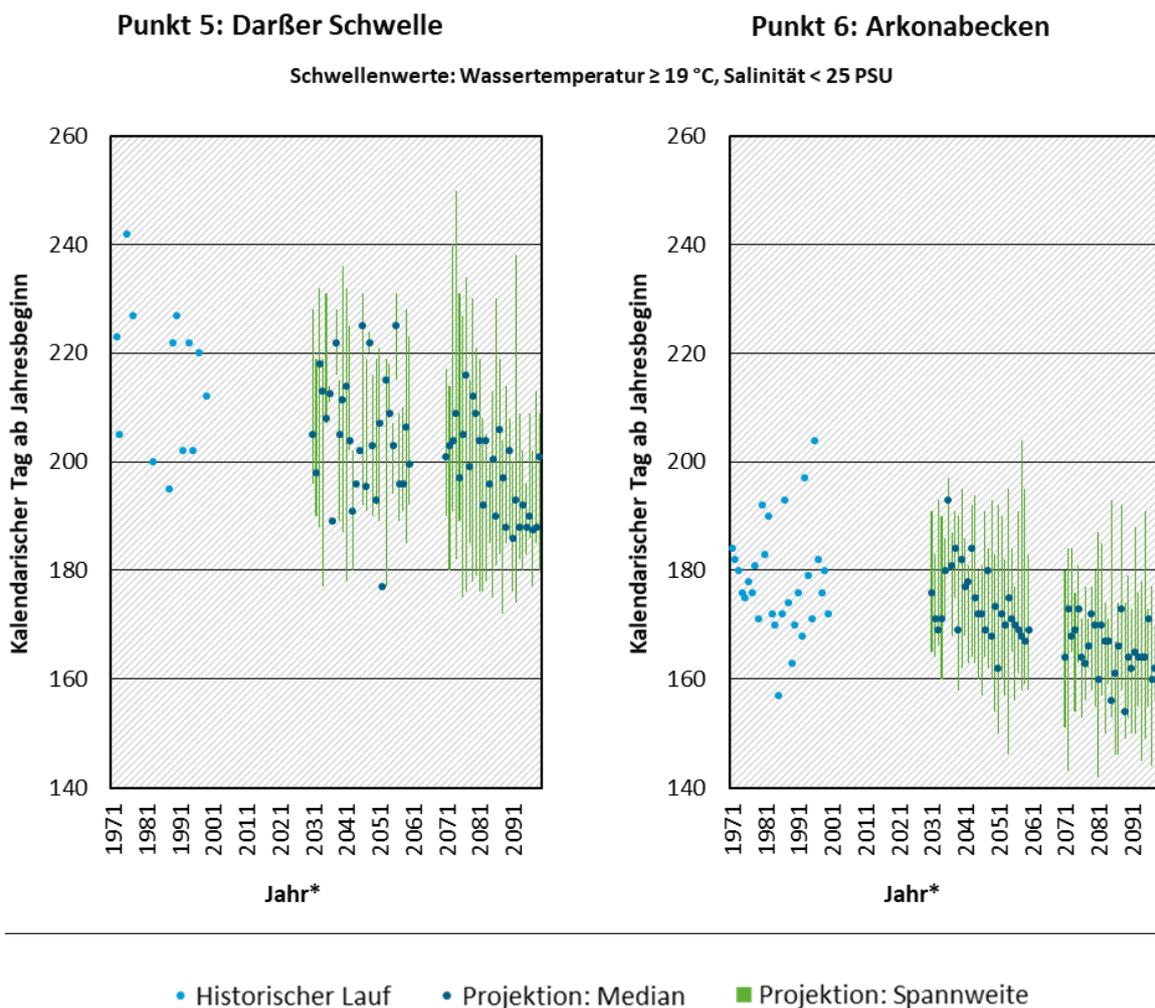
Zu beachten ist außerdem, dass für einzelne Tage durch Interpolation Datenlücken geschlossen werden mussten, weil zwei der Läufe Schaltjahre nicht berücksichtigen und ein Lauf mit einer festen Anzahl von Tagen im Monat (maximal 30) arbeitet. Für einen der fünf Modellläufe fehlen zudem die Daten für das Jahr 2050 – eine Datenlücke, die auch durch Interpolation nicht behoben werden konnte.

Zu einem gewissen Grad wird die Sicherheit der Ergebnisse auch dadurch eingeschränkt, dass Daten nur für wenige Punkte vorliegen. Der Greifswalder Bodden beispielsweise erwärmt sich als Flachwassergebiet besonders schnell und stark. Für ihn aber sind aus den Modellen heraus

⁵⁷ Eine Salinität von 25, angegeben in PSU, entspricht in etwa einem Salzgehalt von 25 g/kg.

keine täglichen Daten verfügbar. Zwar liegen die ausgewählten Punkte, für die tägliche Daten verfügbar sind, verhältnismäßig nah an der Küste, was von Bedeutung ist, da sich die flachen Küstengewässer besonders schnell und stark erwärmen (der für die *Vibrio*-Aktivität benötigte Temperaturschwellenwert wird hier also schneller erreicht als im tieferen Wasser; außerdem wird hier auch gebadet), doch bilden die Daten durch ihre räumliche Auflösung von vier mal vier Kilometern den direkten Küstenstreifen nur eingeschränkt ab. Temperaturen der Flachwasserbereiche werden mit denen tieferer Meeresregionen gemittelt. Die großen Gitterzellen spiegeln den Küstenverlauf nur ungenau wider. Zudem kann das eingesetzte Modell RCA-4/NEMO trockenfallende Küstenabschnitte – und damit das Wattenmeer der Nordsee – nicht darstellen (dies ist ein Grund dafür, dass in der Nordsee keine Punkte ausgewählt werden konnten).

Abbildung 22: Spannbreiten der Projektionen zur *Vibrio*-Aktivität in einzelnen Jahren



*Für einen der fünf Läufe für die Zukunft gibt es keine Daten für das Jahr 2050

Datengrundlage: SMHI, bereitgestellt vom BSH 2019

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind die Abflüsse vom Land, die – ebenfalls modelliert und folglich mit Unsicherheit behaftet – als Eingangsdaten insbesondere in die Berechnung der Salinität eingehen. Veränderte Abflüsse könnten in Zukunft zudem mit der Salinität auch das Artenspektrum der Vibrionen in den deutschen Küstengewässern verändern, was möglicherweise neue

Schwellenwerte für die Beurteilung der Umweltfaktoren notwendig machen würde. Auch können Vibrionen, wie das Beispiel aus Brennholt et al. (2014) zeigt, verdriftet werden. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass sie auch dort vorkommen, wo die Daten eigentlich für sie ungünstige Bedingungen vermuten lassen.

Sieht man alle genannten Unsicherheitsfaktoren zusammen, da waren sich die an der KWRA 2021 beteiligten Fachleute einig, ist davon auszugehen, dass die hier dargestellten Modellergebnisse das Risiko für ein Vorkommen gesundheitlich relevanter Vibrionen in Nord- und Ostsee eher unterschätzen.

Tabelle 62: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Wassertemperatur an der Meeresoberfläche	Tag im Jahr, an dem das Oberflächenwasser erstmals eine Temperatur von mindestens 19 Grad Celsius und eine Salinität < 25 (angegeben in PSU) hat	GE-KL-08
Salinität an der Meeresoberfläche		

Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

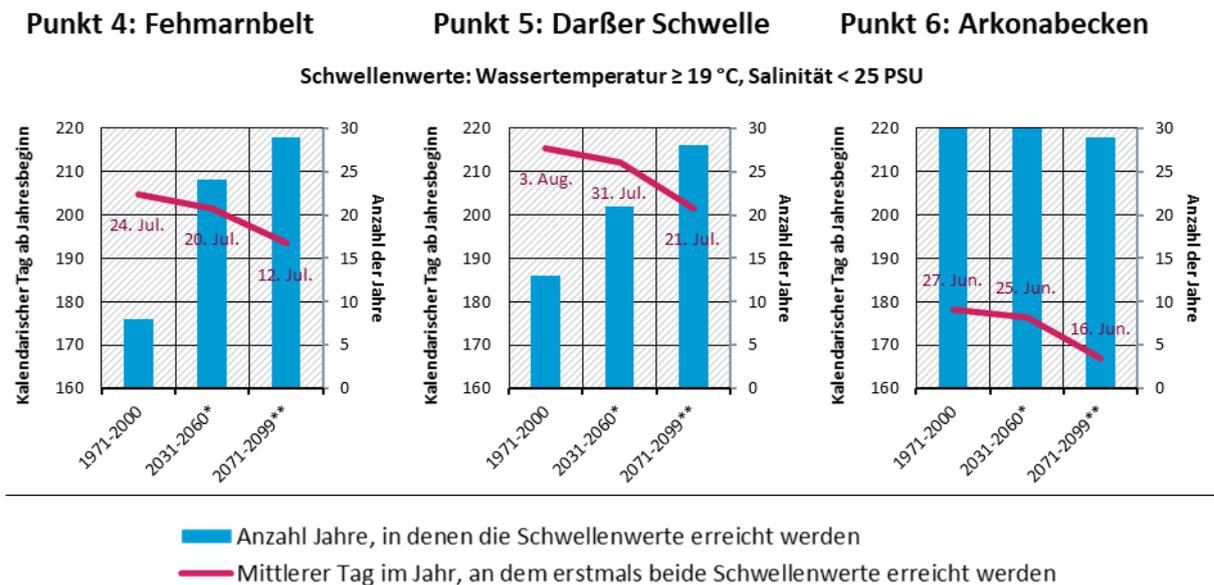
Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30- oder 29-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (hier abweichend: 2071 bis 2099) kann in diesem Kapitel kein optimistischer und pessimistischer Fall ausgewiesen werden. Hintergrund ist, dass für Meerestemperaturen und Salzgehalt nur fünf Modellläufe vorlagen. Das Ensemble war folglich zu klein, um Perzentile zu bilden. Dargestellt werden (wie oben beschrieben) Median-Werte.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Abbildung 23 zeigt für alle drei betrachteten Punkte in der Ostsee pro Zeitraum den mittleren Tag im Jahr, an dem der definierte Indikator erstmals erreicht wird (magentafarbene Linie). Außerdem ist aufgetragen, in wie vielen Jahren je Zeitraum der gekoppelte Indikator überhaupt erreicht wird, sodass relevante *Vibrio*-Aktivität beginnt. Zu beachten ist dabei, dass entsprechend der Datenverfügbarkeit der Zeitraum zum Ende des Jahrhunderts entgegen der in dieser Klimawirkungs- und Risikoanalyse üblichen Definition nur bis zum Jahr 2099 geht und folglich in maximal 29 Jahren eine relevante *Vibrio*-Aktivität ausgelöst werden kann.

Es zeigen sich in der Abbildung deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Punkten. Besonders auffällig ist der Punkt 6 bei Usedom („Arkonabecken“). Bereits in der Bezugsperiode wird hier in jedem der 30 Jahre relevante *Vibrio*-Aktivität erreicht und das im Mittel bereits Ende Juni. Am Punkt 4 wurden die definierten Schwellenwerte hingegen in der Bezugsperiode nur in acht Jahren und am Punkt 5 in 13 Jahren erreicht. Auch setzte die relevante *Vibrio*-Aktivität an diesen beiden Punkten im Mittel deutlich später ein, am Punkt 4 Ende Juli und am Punkt 5 Anfang August.

Abbildung 23: Zeitpunkt des Einsetzens relevanter Vibrionen-Aktivität an den Punkten Fehmarnbelt, Darßer Schwelle und Arkonabecken in den Zeiträumen 1971-2000, 2031-2060 und 2071-2099 und 2071-2099



*Für einen der fünf Läufe für die Zukunft gibt es keine Daten für das Jahr 2050.

** Der Zeitraum für das Ende des Jahrhunderts umfasst modellbedingt nur 29 Jahre. Die letzte der drei Säulen erscheint daher etwas kürzer, auch wenn in allen Jahren des Zeitraums die Schwellenwerte erreicht wurden.

Daten: SMHI, bereitgestellt vom BSH 2019

Datengrundlage: SMHI, bereitgestellt vom BSH 2019

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Bis zur Mitte des Jahrhunderts gibt es vor allem an den Punkten 4 und 5 interessante Änderungen: Laut Projektionen wird in deutlich mehr Jahren der kombinierte Indikator aus Salinität und Wassertemperatur erreicht. Betrachtet man den Median der fünf Modellläufe, könnte in 24 von 30 Jahren am Punkt 4 gesundheitlich relevante *Vibrio*-Aktivität einsetzen. Am Punkt 5 würde der Indikator in 21 von 30 Jahren erreicht. Am Punkt 6 bliebe es dabei, dass die *Vibrio*-Aktivität jedes Jahr einsetzt. An allen drei Punkten verschöbe sich der mittlere Zeitpunkt des Einsetzens dieser Aktivität nur um wenige Tage nach vorn.

Für die Mitte des Jahrhunderts ist ebenso wie für das Ende des Jahrhunderts davon auszugehen, dass die Ostsee als Reiseziel an Attraktivität gewinnt, insbesondere wenn die Temperaturen in anderen Destinationen für Badeurlaub (zum Beispiel das Mittelmeer) infolge des Klimawandels so stark steigen, dass die Urlauber dort starker Hitzebelastung ausgesetzt wären. Dies könnte zu steigenden Gästezahlen an Nord- und Ostsee und somit zu mehr Badenden führen, wodurch die Zahl der potenziell Betroffenen stiege. Unter Berücksichtigung des demographischen Wandels könnte unabhängig davon auch der Anteil der besonders sensitiven Badenden ansteigen.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Für das Ende des Jahrhunderts projizieren die Modelle eine Verschiebung des Starts der gesundheitlich relevanten *Vibrio*-Aktivität nach vorn. Am Punkt 4 könnte sie im Mittel zwölf Tage früher als in der Bezugsperiode beginnen, also bereits Mitte Juli. Am Punkt 5 würden die Schwellenwerte ebenfalls im Mittel zwei Wochen früher erreicht. Am Punkt 6 verschöbe sich der Startpunkt im Mittel um elf Tage nach vorn auf Mitte Juni. An Punkt 4 und 6 wären Vibrionen laut

Projektionen in allen Jahren dieses Zeitraums ein relevantes Gesundheitsthema. Am Punkt 5 könnten in 28 von 29 Jahren die kritischen Schwellenwerte erreicht werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 63: „Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		hoch		mittel	

Kernaussagen zu „Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen“

- ▶ Vibrionen kommen natürlicherweise in Brackwasser vor. Das Infektionspotenzial ist aber von der Wassertemperatur abhängig.
- ▶ Mit der Erwärmung der Meere könnte die Zahl der Infektionen durch Vibrionen steigen, weil diese früher aktiv werden und somit länger aktiv sind.
- ▶ Möglich ist, dass das Thema auch deshalb an Relevanz gewinnt, weil die Bevölkerung insgesamt älter (und damit potenziell sensitiver) wird und die Ostsee als vergleichsweise salzarmes Meer an Attraktivität als Urlaubsort gewinnt.

4.2.4 UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)

Hintergrund und Stand der Forschung

Die ultraviolette (UV-)Strahlung⁵⁸ ist der energiereichste Teil der optischen Strahlung (BfS 2019). Sie wird anhand ihrer physikalischen Eigenschaften und biologischen Wirkungen unterteilt in UV-A-, UV-B- und UV-C-Strahlung. UV-A-Strahlung schließt sich mit ihrem Wellenlängenbereich direkt an das sichtbare Licht an. Die im Vergleich dazu kurzwellige UV-C-Strahlung grenzt unmittelbar an den Bereich der ionisierenden Strahlung. Zwischen UV-A- und UV-C-Strahlung liegt im elektromagnetischen Spektrum die UV-B-Strahlung. Es gilt: Je kürzer die Wellenlänge, desto energiereicher ist die Strahlung und umso schädigender wirkt sie. Natürliche Quelle für UV-Strahlung ist die Sonne. Wie viel UV-Strahlung an der Erdoberfläche ankommt, hängt von Breitengrad, Sonnenstand, Höhenlage, Bewölkungsgrad und Art der Bewölkung, dem Ozongehalt der Atmosphäre, dem Aerosolgehalt der Luft sowie der Albedo (dem Rückstrahlvermögen) von Oberflächen ab (Bais et al. 2015).

UV-Strahlung führt zu schwerwiegenden Erkrankungen der Haut und der Augen. Eine Zusammenfassung der biologischen und gesundheitlichen Wirkungen der UV-Strahlung gibt die Strahlenschutzkommission (SSK) in ihrer Empfehlung „Schutz des Menschen vor den Gefahren solarer UV-Strahlung und UV-Strahlung in Solarien“ (SSK 2016). Natürliche und künstlich erzeugte UV-Strahlung ist von der Internationalen Agentur für Krebsforschung (International Agency for Research on Cancer, IARC) als „krebserregend für den Menschen“ eingestuft (El Ghissassi et al. 2009). Sie ist Hauptursache für Hautkrebs (SSK 2016), die weltweit häufigste Krebserkrankung hellhäutiger Menschen (Apalla et al. 2017). In Deutschland erkrankten 2015 rund 290.000 Menschen neu an Hautkrebs, und rund 4.000 Menschen versterben jährlich daran (GEKID 2017). Die Zahl der Neuerkrankungen nimmt weltweit zu und hat sich in Deutschland seit dem Jahr 2000

⁵⁸ Die UV-Strahlung liegt im Wellenlängenbereich zwischen 100 und 400 Nanometern. UV-A-Strahlung hat Wellenlängen zwischen 315 und 400 Nanometern, UV-B-Strahlung zwischen 280 und 315 Nanometern und UV-C-Strahlung zwischen 100 und 280 Nanometern.

mehr als verdoppelt (BfS 2019). UV-bedingte Erkrankungen insgesamt, vor allem aber Hautkrebskrankungen, belasten das Wohl der Allgemeinheit und verursachen hohe Kosten für das Gesundheitswesen, die stetig steigen (UV-Schutz-Bündnis 2017; Leitlinienprogramm Onkologie 2021).

UV-bedingte Hautschädigungen können grundsätzlich jeden treffen. Das individuelle Erkrankungsrisiko wird durch verschiedene Risikofaktoren beeinflusst, die in der onkologischen S3-Leitlinie „Prävention von Hautkrebs“ ausführlich beschrieben sind (Leitlinienprogramm Onkologie 2021). In Zusammenhang mit dem Klimawandel ist der Risikofaktor „UV-Expositionsmuster“, also wie lange und auf welche Weise Personen sich UV-Strahlung aussetzen, bedeutend. Personen, die viel Zeit in der Sonne verbringen, haben ein erhöhtes Hautkrebsrisiko, zum Beispiel im Freien arbeitende Personen (Knuschke 2011; Capellaro und Sturm 2015a; Leitlinienprogramm Onkologie 2021). Sonnenbrände erhöhen in jedem Alter das Risiko für schwarzen Hautkrebs um rund das Zweifache – in der Kindheit um das Zwei- bis Dreifache. Kinder sind insgesamt besonders gefährdet, da Kinderhaut und -augen empfindlicher gegenüber UV-Strahlung sind als die Erwachsener (Volkmer und Greinert 2011; SSK 2016).

Der Klimawandel kann auf unterschiedliche Weise die UV-Belastung der Bevölkerung erhöhen. Zum einen können in der nördlichen Hemisphäre sogenannte Niedrigozonereignisse („low ozone events“) auftreten, die für wenige Tage Ende März / Anfang April zu unerwartet hohen UV-Strahlungsbelastungen führen können (Bais et al. 2018; Leitlinienprogramm Onkologie 2021). Sie sind gesundheitlich bedeutend, weil die Haut im Frühjahr besonders empfindlich ist (Augustin et al. 2017). Ursache für die Niedrigozonereignisse sind lange und kalte arktische Winter, die die Bildung stabiler Polarwirbel und damit den chemischen Ozonverlust⁵⁹ über der Arktis begünstigen (Arnone et al. 2012), wie in den Wintern 2004/2005 (Rex et al. 2006), 2010/2011 (Manney et al. 2011) und 2020 (Neale et al. 2021) geschehen. Die letzte Episode im Frühjahr 2020 führte zu dem bisher größten Ozonverlust in den 40-jährigen Messungen in der Arktis (Lawrence et al. 2020). Die gegen Ende des Winters einsetzende Auflösung des Polarwirbels führt die so entstandenen ozonarmen Luftmassen in Richtung Süden.

Die Häufigkeit von arktischen Wintern mit besonders kalten, stabilen Polarwirbeln und in der Folge von Niedrigozonereignissen über dem europäisch-atlantischen Sektor hat in den letzten zwei Dekaden zugenommen (Reid et al. 2000; Stenke und Grewe 2003; Brönnimann und Hood 2004; Rex et al. 2006). Ihr häufigeres Auftreten könnte mit der globalen Erwärmung in Zusammenhang stehen (Rex et al. 2004; Rex et al. 2006; Hobe et al. 2013). Die zunehmende Menge an CO₂ und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre könnte die Abkühlungsprozesse im Polarwirbel im Winter verstärken (Shindell et al. 1998). Möglich ist zudem, dass eine durch den Klimawandel veränderte Dynamik in Troposphäre und Stratosphäre zusätzlich zu Temperaturänderungen im Polarwirbel beiträgt. Eine andere Theorie besagt, dass ozonabbauende Substanzen die bedeutendere Ursache des beschriebenen Ozonverlusts im Polarwirbel waren und sich die Wahrscheinlichkeit von Niedrigozonereignissen klimawandelbedingt daher nicht erhöht (Rieder und Polvani 2013; Rieder et al. 2014). Noch sind diese Zusammenhänge Gegenstand aktueller Forschung.

Die Entwicklung der UV-Strahlung wurde anhand von UV-Messungen für mehrere europäische Stationen berechnet (Fountoulakis et al. 2020). Diese neuen Studien zeigen, dass die Veränderungen der UV-Strahlung in den letzten 20 Jahren in der Regel weniger als circa vier Prozent pro Jahrzehnt betragen, da das Montrealer Protokoll einen starken Rückgang der Ozonschichtdicke

⁵⁹ Bei sehr niedrigen Temperaturen können im Polarwirbel stratosphärische Wolken aus Wasser-Salpetersäure-Gemischen oder Wasser entstehen, die eine entscheidende Rolle beim Ozonabbau spielen (Brönnimann 2002).

verhindert hat. An den meisten Orten außerhalb der Polarregionen werden langfristige Veränderungen der UV-Strahlung hauptsächlich durch Schwankungen des Bewölkungsgrades, der Aerosole und der Oberflächenreflektivität bestimmt, während Veränderungen der Ozonschichtdicke weniger wichtig sind (Neale et al. 2021).

Die Ergebnisse dieser bodengestützten Messungen werden durch Satellitendaten auch für Deutschland bestätigt (Vitt et al. 2020). Aufgrund der Methoden der satellitengestützten Datenermittlung spiegeln die zeitlichen Veränderungen der UV-Strahlung hier vor allem die Auswirkungen von Veränderungen der Bewölkung und der Ozonschichtdicke wider. Um die langfristigen Veränderungen der UV-Strahlung zu analysieren, wurden die Zeiträume 1983 bis 1992 und 2006 bis 2015 verglichen. Für die Hälfte der analysierten Standorte in Deutschland wurde ein statistisch signifikanter Anstieg der Werte des UV-Index festgestellt. Der statistisch signifikante Anstieg pro Jahrzehnt reicht von +1,2 Prozent bis +3,6 Prozent des mittleren jährlichen UV-Index. An den Standorten in Deutschland nahm der UV-Index vor allem in den Frühlings- und Frühsommermonaten zu (Vitt et al. 2020).

In Deutschland traten in den letzten Jahren vermehrt wolkenlose, sonnige Tage auf, wodurch sich die Sonnenscheindauer übers Jahr erhöht (DWD 2019a). Erste Auswertungen der Daten des UV-Messnetzes⁶⁰ durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zeigen, dass in Jahren mit einer hohen Sonnenscheindauer auch die übers Jahr aufsummierten Tagessummen der sonnenbrandwirksamen UV-Bestrahlungsstärke erhöht sind (Baldermann und Lorenz 2019).

Ein weiterer, zu beachtender Faktor, der die UV-Belastung der Menschen beeinflussen könnte, sind klimawandelbedingte Wetterveränderungen und deren Auswirkung auf das menschliche Verhalten – also auf die Häufigkeit und Dauer von Aufenthalten im Freien. Maßgeblicher Faktor ist hier das thermische Empfinden.

Noch sind viele Fragen zum Zusammenhang von Klimawandel, Ozongehalt der Atmosphäre und UV-Strahlungsbelastung ungeklärt. Um diese zu beantworten, ist weitere Forschung dringend notwendig. Als wichtiger Umweltparameter wird die UV-Strahlungsintensität weltweit überwacht. Neben der Datenerhebung ist es Ziel, die Bevölkerung über die herrschende UV-Intensität zu unterrichten, sodass Sonnenschutzmaßnahmen zur Prävention UV-bedingter Erkrankungen, insbesondere des Hautkrebses, rechtzeitig ergriffen werden können. Die Messergebnisse werden als UV-Index (UVI) veröffentlicht. In Deutschland wird dies vom Bundesamt für Strahlenschutz⁶¹ und dem Deutschen Wetterdienst⁶² geleistet.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Eine Erholung der stratosphärischen Ozonschicht wäre mit einem regional unterschiedlich ausfallenden Rückgang der UV-Strahlungsbelastung verbunden. Bisherige Arbeiten zeigen, dass im Falle des RCP8.5 die Ozonwerte in der Stratosphäre außerhalb der Tropen gegen Ende des Jahrhunderts wieder die der 1960er Jahre erreichen könnten (Bais et al. 2019). Die Weltorganisation für Meteorologie (englisch: World Meteorological Organization, WMO) prognostiziert, dass der Gesamtzongehalt (inklusive Troposphäre) über den mittleren Breiten der Nordhalbkugel bis 2030 wieder das Niveau der 1980er Jahre erreichen könnte (WMO 2018). Grund dafür ist der erfolgreiche Schutz der Ozonschicht im Rahmen des Montrealer Protokolls.

Neue Simulationen mit einem Chemieklimamodell für den Zeitraum 1960 bis 2100 wurden verwendet, um Trends der UV-B-Strahlung in den mittleren Breiten abzuleiten (Eleftheratos et al. 2020). Die UV-B-Strahlung wird zwischen 2050 und 2100 voraussichtlich um 1,3 Prozent pro

⁶⁰ Siehe auch: http://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/uv-index/uv-messnetz/uv-messnetz_node.html

⁶¹ Siehe auch: www.bfs.de/uv-index

⁶² Siehe auch: www.uv-index.de

Jahrzehnt zunehmen. Nach 2050 wurde durch das Modell kein Trend zur Ozonschichtdicke festgestellt. Der Trend der UV-B-Strahlung wurde auf einen statistisch signifikanten Rückgang der Wolkendecke um 1,4 Prozent pro Jahrzehnt infolge steigender Treibhausgase zurückgeführt. Die Studie legt damit nahe, dass Veränderungen der UV-B-Strahlung in den mittleren Breiten in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts von anderen Faktoren als Veränderungen der stratosphärischen Ozonschicht dominiert werden (Eleftheratos et al. 2020). Diese Projektionen hängen jedoch von der genauen Beschreibung von Wolken durch Klimamodelle ab. Die Unsicherheiten bei der Modellierung von Wolken gelten folglich auch für die projizierten Veränderungen der UV-Strahlung.

Ein neues Klimaprojektionsensemble für Deutschland (Brienen et al. 2020) zeigt in Zukunft eher Tendenzen in Richtung Abnahme der Globalstrahlung im sichtbaren Bereich. Die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen schließt jedoch auch positive Trends (Zunahmen) insbesondere im Sommer und Herbst ein (Brienen et al. 2020).

Die Änderungen der Menge und Zusammensetzung der Luftschadstoffe aufgrund der sozioökonomischen Entwicklung, die zugleich die Treibhausgasemissionen beeinflusst, sind weitere Quellen für Unsicherheiten (Watanabe et al. 2011; Corrêa et al. 2013; Bais et al. 2019). Zudem sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die dynamischen Prozesse in der Atmosphäre bisher nur unzureichend verstanden (Screen et al. 2018; Bais et al. 2019). Gleiches gilt für die gegenseitige Beeinflussung von Klimawandel und stratosphärischer Ozonschicht (Bais et al. 2018).

Zusätzlich zu den klimawandelbedingt veränderten Bestrahlungsstärken der UV-Strahlung zeigen Studien, dass sich auch das Verhalten der Menschen den veränderten klimatischen Bedingungen anpassen könnte – ein nicht zu vernachlässigender Faktor für Abschätzungen des zukünftigen durch den Klimawandel beeinflussten Risikos UV-bedingter Erkrankungen (Baldermann 2017; Leitlinienprogramm Onkologie 2021). Große Hitze beispielweise könnte künftig dazu führen, dass sich die Menschen vermehrt in gekühlten Innenräumen aufhalten, wodurch die jährliche UV-Belastung sinken könnte. Auf der anderen Seite zeigen erste Untersuchungen, dass an Tagen mit Temperaturen im thermischen Komfortbereich des Menschen die Attraktivität von Tätigkeiten im Freien zunimmt. Die Anzahl dieser Tage im Jahr könnte mit dem Klimawandel ansteigen. Darüber hinaus spielen auch individuelle Vorlieben und Anpassungsprozesse eine wichtige Rolle (Leitlinienprogramm Onkologie 2021). Wie sich das Verhalten infolge des Klimawandels ändern wird, lässt sich daher nur schwer voraussagen.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 64: „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		sehr gering	

Kernaussagen zu „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“

- ▶ UV-Strahlung ist krebserregend (SCHEER 2016) und Hauptursache für Hautkrebs. Die Hautkrebsneuerkrankungsraten steigen seit Jahrzehnten an. Mit dem Klimawandel könnte sich die Situation verschärfen.
- ▶ Mit dem Klimawandel geht bis dato in Deutschland eine Zunahme der Sonnenscheinstunden beziehungsweise eine Abnahme der Bewölkung einher. Dies erhöht die potenzielle UV-Strahlungsbelastung der Bevölkerung. Die zukünftige Entwicklung ist unsicher.
- ▶ Komplexe Wechselwirkungen zwischen Treibhausgasen, Klimawandel und der stratosphärischen Ozonschicht können eine Erholung der Ozonschicht stark beeinflussen. Dies könnte eine erhöhte UV-Belastung der Bevölkerung zur Folge haben. Niedrigozonereignisse in der nördlichen Hemisphäre traten in den letzten zwei Jahrzehnten vermehrt auf. Diese können eine signifikant erhöhte UV-Belastung der Bevölkerung zur Folge haben.
- ▶ Das veränderte Klima kann zudem Einfluss auf das Verhalten der Menschen haben, was zu vermehrtem Aufenthalt im Freien und damit zur Erhöhung der UV-Strahlungsbelastung führen könnte.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „UV-bedingten Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“

Die Sensitivität für UV-bedingte Gesundheitsschädigungen wird durch innere (individuelle) und äußere (strukturelle, aus der Umwelt kommende) Faktoren beeinflusst. Innere Faktoren sind konstitutionelle (vererbte wie der Hauttyp) und erworbene Faktoren (beispielsweise eine hohe Anzahl an Muttermalen oder Hautkrebs in der Familie) sowie das durch das eigene Verhalten beeinflusste UV-Expositionsmuster (Sonnenbrände, intermittierende UV-Strahlungsbelastungen, UV-Lebenszeitdosis) (SSK 2016; Leitlinienprogramm Onkologie 2021). In Bezug auf den Risikofaktor „UV-Expositionsmuster“ sind die Risikowahrnehmung und damit die Akzeptanz und die Motivation, am eigenen Verhalten etwas zu ändern, entscheidend. Gerade was die Risikowahrnehmung betrifft, ist festzustellen, dass das gesundheitliche Risiko durch UV-Strahlung zwar weitestgehend bekannt ist, es aber am dementsprechenden Schutzverhalten mangelt. Dies gilt nicht nur auf individueller, sondern auch auf breiter gesellschaftlicher Ebene (Expertenaussage, Juli 2020).

Äußere Faktoren, die die räumliche Exposition gegenüber UV-Strahlung beeinflussen, sind der Ozongehalt der stratosphärischen Ozonschicht, der Sonnenstand, die Sonnenscheinstunden, die Bewölkung, Treibhausgase und Aerosole, die Standorthöhe und das Reflexionsvermögen von Oberflächen (Albedo) (Slaney 1986; Bais et al. 2018; Baldermann und Lorenz 2019).

Da UV-Strahlung (im Gegensatz zu Hitze) nicht spürbar ist und darum auch nicht als unmittelbar bedrohlich wahrgenommen wird, mangelt es vielfach am Bewusstsein für das Problem und damit an der Motivation, der Gefährdung konsequent entgegenzuwirken. Vor dem Hintergrund, dass UV-bedingte Erkrankungen, insbesondere Krebserkrankungen, seit Jahrzehnten kontinuierlich ansteigen und der Klimawandel diese Situation noch verschärft, ist darum eine zielgruppenorientierte, nachhaltige und flächendeckende Etablierung präventiver Maßnahmen dringend geboten (UV-Schutz-Bündnis 2017; Leitlinienprogramm Onkologie 2021). Dabei ist zu betonen, dass diese Maßnahmen nicht bedeuten, UV-Strahlung und damit die Sonne komplett zu meiden. Es geht darum, die Voraussetzungen für einen bewussten Umgang mit Sonne und UV-Strahlung zu schaffen und einen lebhaften UV-Schutz zu ermöglichen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Allgemein gilt für den Umgang mit sich erhöhenden UV-Strahlungsbelastungen, dass Maßnahmen sowohl auf individueller als auch auf struktureller, die Lebenswelten der Menschen betreffender Ebene zu ergreifen sind. Der APA III sieht hierzu folgende Instrumente und Maßnahmen vor:

Tabelle 65: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung in Bezug auf die Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III entnommen (Bundesregierung 2020) und hier zusammengefasst wiedergegeben.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
4.1 4.2	Staatliche Regeln zum Arbeitsschutz; Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Bestehende Vorschriften und staatliche Regeln zum Arbeitsschutz (Schutz vor arbeitsbedingten Gefährdungen durch klimawandelbedingt erhöhte UV-Strahlung) und zur Arbeitsmedizin (Vorsorgeuntersuchung für BK 5103) gemäß ArbMedVV werden geprüft und evaluiert, um möglichen Anpassungsbedarf zu bestimmen.
4.3 - 4.7 4.26 4.27	Zielgruppenspezifische Informationsmaterialien und -tools zur Schulung und Aufklärung; Anpassung der Informations- und Frühwarnsysteme und Ausweitung der Zielgruppe	Wissen (Bildung, Aus-/Weiterbildung); Motivation und Akzeptanz	Zur Wissensgenerierung, Akzeptanzförderung und Erleichterung der Integration von UV-Schutz in den Alltag sind folgende Maßnahmen vorgesehen: <ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung, Überprüfung und Förderung von Informations- und Schulungsangeboten (zum Beispiel Multiplikator-schulung) für Gesundheitswesen und Arbeit (Arbeit im Freien) - Integration des Themas „Schutz vor UV-Strahlung“ in Lehr-, Erziehungs- und Bildungspläne der frühkindlichen Erziehung und des Schulunterrichts auf Basis eines Grundlagenkatalogs sowie in Lehr-, Studien- und Ausbildungspläne und Weiter- und Fortbildungen anzusprechender Berufsbilder (UV-Schutz-Bündnis 2017) . - Themen, die in den schulischen Unterricht und die frühkindliche Erziehung aufgenommen werden sollten (RKI/UBA 2013, 17): <ul style="list-style-type: none"> o Folgen hoher UV-Belastung o Informationen zu möglichen Schutzmaßnahmen o Motivations- und Wissensdefizite zu angepasstem Verhalten im Freien beheben

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			<ul style="list-style-type: none"> ○ Breite Bekanntgabe des regionalen UV-Index (Information über UV-Intensität und dementsprechende Schutzmaßnahmen) ○ Hautkrebscreening als Vorsorgeuntersuchung bekannter machen - Erstellen von Informationsmaterialien für vulnerable Gruppen (zum Beispiel Kleinkinder, vorerkrankte Personen) - Unterstützung unter anderem der Aktivitäten des Öffentlichen Gesundheitswesens (ÖGD) und der Akademie für Öffentliches Gesundheitswesen bei Konzeption von Weiterbildungsmaßnahmen im Sozial-, Gesundheits- und Pflegebereich - Integration von UV-Belastung in Frühwarnsysteme - Zielgruppenspezifische Anpassung der Informationswege und -zustellungsformen (RKI/UBA, 16) - Schaffung technischer und organisatorischer Voraussetzungen zur Harmonisierung von Frühwarnsystemen und optimierten Verteilung
<p>4.14 - 4.16 4.19 4.20 4.22</p>	<p>Integriertes Gesundheits- und Umweltmonitoringsystem (One Health Ansatz), Evaluierungen bestehender Maßnahmen, Förderung von Studien zur gesundheitlichen Auswirkung; Studie zur Erreichbarkeit vulnerabler Personen; Berichterstattung, Förderung von Nachwuchsgruppen „Globaler Wandel: Klima, Umwelt und Gesundheit“</p>	<p>Wissen (Forschung, Monitoring)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Einrichtung eines integrierten Umwelt- Gesundheitsbeobachtungssystems auf Bundesebene auf Basis bestehender Strukturen, mit dem gesundheitsrelevante Umweltfaktoren beobachtet und gesundheitlichen Beeinträchtigungen zugeordnet werden können. Berücksichtigung der UV-Strahlung als gesundheitsrelevanter Umweltfaktor. - Evaluierung der Umsetzung und Wirksamkeit von Handlungsempfehlungen und Präventionsmaßnahmen (zum Beispiel UV-Index), Formulierung von Empfehlungen für deren Aktualisierung und Weiterentwicklung - Entwicklung belastbarer Methoden und Modellen zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf das Gesundheitssystem - Informationsmaterialien für vulnerable Bevölkerungsgruppen (zum Beispiel Kleinkinder, ältere bzw. vorerkrankte Personen) sollen zielgruppenorientiert erstellt und gestreut werden. Dabei sind verschiedene Möglichkeiten der Erreichbarkeit zu beachten - Überarbeitung des Sachstandsberichts „Klimawandel und Gesundheit“ (RKI 2010): Umfassende, wissenschaftliche Darstellung der verschiedenen Problemlagen, Ergänzung bisher noch nicht enthaltener Schwerpunkte
<p>4.17 4.28</p>	<p>Durchführung/Förderung von Studien zu stadtplanerischen Anpassungsmaßnahmen; Planungswerkzeuge und Informationsmaterialien zu klimaresilienten</p>	<p>Wissen (Forschung, Monitoring); Technologie und natürliche Ressourcen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung von Indikatoren für UV-Monitoring (Impact-Indikatoren, Response-Indikatoren, Governance-Indikatoren) (BBSR 2016, 48). - Entwicklung von GIS-basierten Modellierungsprogrammen zur Visualisierung der UV-Strahlungsbelastung für Stadt- und Gebäudeplanung sowie Landschaftsarchitektur, um die Schaffung sinnvoll UV-reduzierter Außenbereiche zu erleichtern. - Informationen zu Eigenschaften verschiedener Baumarten und zu Standortfaktoren hinsichtlich Schatten und Transpirationsprozesse für effektive Reduzierung der (Wärme- und) UV-Belastung in stark verdichteten Siedlungsgebieten

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
	und nicht-allergenen Stadtbäumen für Kommunen		

Die beschlossenen Maßnahmen, die dazu dienen, Wissen zu vermitteln, Akzeptanz zu generieren und zu einem gelebten UV-Schutz zu motivieren, werden durch Optionen ergänzt, die dem Einzelnen ein UV-Schutz-gerechtes Handeln in seiner jeweiligen Lebenswelt ermöglichen beziehungsweise erleichtern. Diese kombinierte Herangehensweise erlaubt es, den hohen Ansprüchen an die Präventionsarbeit, die die Risikowahrnehmung, die Akzeptanz und die Motivation für präventives Handeln zu stärken hat, gerecht zu werden. Positiv wirkt sich hier aus, dass einige verhältnispräventive Maßnahmen zur Reduzierung der UV-Strahlungsbelastung auch eine hitzereduzierende Wirkung haben und diese Synergien eine effektive Nutzung finanzieller und personeller Ressourcen ermöglichen.

Weiterreichende Anpassung

Ein wichtiger Schlüssel zur Senkung des Risikos für UV-bedingte Gesundheitsschädigungen liegt in der Kontinuität der präventiven Maßnahmen. Nachfolgend sind Möglichkeiten zusammengefasst, die eine solche Kontinuität etablieren und somit zu einer weiterreichenden Anpassungsfähigkeit beitragen.

Tabelle 66: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene ⁶³	Charakteristika
Förderung der flächendeckenden Etablierung von verhaltenspräventiven Maßnahmen; Entwicklung von Multikomponenten-Programmen zur Aufklärung über die UV-bedingte Gesundheitsgefährdung und Anwendung entsprechender Schutzmaßnahmen (Baldermann und Weiskopf 2020; Leitlinienprogramm Onkologie 2021)	Wissen; Motivation und Akzeptanz; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Umfassende und nachhaltige Informationsverbreitung sowie Bewusstseins- und Akzeptanzstärkung gegenüber UV-strahlungsbedingten gesundheitlichen Risiken in allen Altersgruppen	Kommunen; Erzieher; Lehrkräfte; Ärzte; Patientenvertretungen; Medien; Wetterberichterstattung; politische Entscheidungsträger auf Bund-, Länder- und Kommunalebene	Nachhaltige (immer wiederkehrende), zielgruppenspezifizierte theoretische und praktische, qualitätsgeprüfte Aufklärungsarbeit
Förderung der flächendeckenden Etablierung verhältnispräventiver Maßnahmen auf kommunaler Ebene (UV-Schutz-Bündnis 2017; Baldermann und Weiskopf 2020)	Wissen; Motivation und Akzeptanz; Rechtliche Rahmenbedingungen	Reduzierung der UV-Strahlungsbelastung in den Lebenswelten der Menschen durch Beschattungsmaß-	Bund, Länder- und Kommunen	Verbesserung der Rahmenbedingungen in den Lebenswelten der Menschen

⁶³ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene ⁶³	Charakteristika
	und politische Strategien; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	nahmen (zum Beispiel Bepflanzungen, Sonnensegel) und Anpassung von Arbeits- und Tagesabläufen		
Aufnahme des Themas als Teilziel der bereits mit Bezug auf das Präventionsgesetz formulierten Gesundheitsziele „Gesund aufwachsen“ und „Gesund älter werden“; Anpassung baurechtlicher Regelungen (UV-Schutz-Bündnis 2017)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Gesetzliche Verankerung der Prävention UV-bedingter Erkrankungen, insbesondere des Hautkrebses	Bund	Gesetzliche Regelung zum Schutz der Bevölkerung in ihren Lebenswelten (über arbeitsschutzrechtliche Regelungen hinausgehend); Anpassung entsprechender Richtlinien, Verordnungen und Normen

Über diese zentralen Hebel ließe sich die Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen“ bedeutend stärken. Die flächendeckende Umsetzung und Verstetigung verhaltens- und verhältnispräventiver Maßnahmen hängt neben der rechtlichen Rahmensetzung von personellen und finanziellen Ressourcen ab, derer es insbesondere in den Städten und Gemeinden bedarf.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 67: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	<ul style="list-style-type: none"> - Durch Schaffung und Erhalt von Grünflächen mit Baumpflanzung sowie durch Dach- und Fassadenbegrünung und Ausbau von Bedachungen, die UV-Strahlung blockieren, können Verschattungseffekte im Freien geschaffen werden, die eine Reduzierung hoher UV-Strahlungsbelastung ermöglichen. An kühlen Orten kann durch Verwendung von Materialien, die nur UV-Strahlung und nicht Wärme reduzieren, die Akzeptanz solcher Maßnahmen erhöht werden (Mackay 2003). Durch Fassaden- und Oberflächenbegrünung (beispielsweise Begrünung von Stadtplätzen und Schulpausenhöfen) kann das Rückstrahlvermögen von Oberflächen und damit die UV-Strahlungsbelastung reduziert werden (Baldermann und Weiskopf 2020; Leitlinienprogramm Onkologie 2021) - Ergänzung der Werkzeuge für den klimaresilienten Stadtumbau und geographischer Informationssysteme (GIS), beispielsweise „GIS-ImmoRisk Naturgefahren“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, um UV-Strahlungsthematik

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Der zeitliche Horizont für die Planung, Umsetzung und das Wirksamwerden von Maßnahmen zum Umgang mit potenziell erhöhter UV-Strahlungsbelastung wird größtenteils auf weniger als zehn Jahre eingeschätzt. In wenigen Fällen kann die Anpassungsdauer auch mehrere Jahrzehnte betragen.

Tabelle 68: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Ergänzung, Erweiterung und Etablierung von Informationsmaterialien und -tools zur Schulung und Aufklärung - Flächendeckende Etablierung verhältnispräventiver Maßnahmen (zum Beispiel Ausbau Schattenoasen, Stadtbegrünung) - Gesetzliche Veränderungen, zum Beispiel Ergänzung des Präventionsgesetzes - Optimierung staatlicher und arbeitsmedizinischer Regelungen zum Arbeitsschutz - Verstetigung und Erweiterung bestehender UV-Monitoringsysteme - Integration von UV-Strahlungsbelastung in Frühwarnsysteme - Erarbeitung und Etablierung multikomponenter Aufklärungskampagnen
10-50 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluierung der Umsetzung und Wirksamkeit von Handlungsempfehlungen und Präventionsmaßnahmen

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 69: „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungspotenzial für 2071-2100
	2020-2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung⁶⁴	gering-mittel	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie aus nachstehender Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Motivation und Akzeptanz“, „Finanzielle Ressourcen“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zu leisten.

Tabelle 70: „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	4-5	2-3	3-4	3-4	3-4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

⁶⁴ Die Einschätzungen zur Wirksamkeit der Anpassung und zur Gewissheit der Aussagen beziehen sich jeweils auf heterogene Maßnahmensets, die der Anpassung an „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen“ dienen. Diese Heterogenität stellte eine Herausforderung bei der Einschätzung der Anpassungskapazität gegenüber dem Klimarisiko „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen“ dar.

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.5 Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren

Hintergrund und Stand der Forschung

Vektoren sind Organismen, die Krankheitserreger (Viren, Bakterien, Protozoen oder Helminthen) übertragen können. In diesem Kapitel stehen Tiere im Fokus, die Krankheitserreger auf den Menschen übertragen können. Neben Vektoren werden auch Reservoirtiere betrachtet, also Tiere, die Krankheitserreger nicht direkt auf den Menschen übertragen, in denen sich solche Erreger aber vermehren können. Die Populationsstärke (Abundanz), räumliche Verbreitung und Aktivität vieler Vektoren und Reservoirtiere ist zumindest teilweise von Witterung und Klima abhängig. Der Klimawandel kann sowohl heimische Vektoren und Reservoirtiere begünstigen als auch die Etablierung bisher nicht heimischer Tierarten ermöglichen, die gesundheitlich relevant sein können.

In Deutschland spielen gegenwärtig als Krankheitsüberträger vor allem Schildzecken und kleine Säugetiere (zum Beispiel Nagetiere) eine Rolle. Zu erwähnen ist außerdem die Übertragungsmöglichkeit des West-Nil-Virus durch heimische Stechmücken. 2019 wurden die ersten fünf entsprechenden Fälle in Deutschland bekannt (Frank et al. 2020). Zunehmend werden außerdem Vorkommen von in Deutschland bisher nicht heimischen Stechmücken und seit dem Jahr 2018 zunehmend Nachweise von Schildzecken der Gattung *Hyalomma* mit besonderem Vektorpotenzial beobachtet. Große Aufmerksamkeit erfährt die Ausbreitung der Asiatischen Tigermücke (*Aedes albopictus*), da diese ein relevanter Überträger humanpathogener Erreger ist, darunter das Chikungunya- und das Denguevirus. Untersuchungen zeigen, dass die mit dem Klimawandel verbundene Erwärmung die Gunsträume der Asiatischen Tigermücke in Deutschland vergrößert (Thomas et al. 2018). Sie könnte sich künftig also in Regionen etablieren, wo dies heute wahrscheinlich noch nicht möglich wäre. Jedoch gibt es Gunsträume für die Asiatische Tigermücke auch in Deutschland schon lange, sodass eine Besiedelung regional auch früher hätte stattfinden können. Allerdings ist sie selbst in Südeuropa noch nicht lange verbreitet und erreicht Deutschland daher erst in jüngster Vergangenheit. *Aedes albopictus* gilt als anpassungsfähig, und die Eier dieser Mückenart können durchaus frosttolerant sein (Thomas et al. 2012). Vorkommen und Ausbreitung der Asiatischen Tigermücke sind also bisher weniger vom Klima als primär vom internationalen Personen- und Güterverkehr bestimmt (Tannich 2015). Eine Abschätzung der künftigen Verbreitung erfolgte im Rahmen der KWRA 2021 daher nicht.

Die in Deutschland gesundheitlich relevanteste Zeckenart ist der Gemeine Holzbock (*Ixodes ricinus*), der zur Familie der Schildzecken gehört und bundesweit vorkommt (Maier et al. 2003; Rubel et al. 2014; Kahl et al. 2016; Brugger et al. 2017). Die Zecke kann Lyme-Borreliose und Frühsummer-Meningoenzephalitis (FSME) übertragen, aber auch eine Reihe weiterer Infektionserreger (Maier et al. 2003; Kahl et al. 2016; Brugger et al. 2017). Auch andere in Deutschland nachgewiesene Zeckenarten sind potenziell gesundheitsrelevant (Maier et al. 2003; Rubel et al. 2014; Kahl et al. 2016; Walter et al. 2016; Rubel et al. 2018; Chitimia-Dobler et al. 2019; Hagedorn 2019). Kleinsäuger wie Mäuse, Ratten oder Hasen übertragen beispielsweise Hantaviren, die Erreger der Leptospirose und Tularämie (Maier et al. 2003; Stark et al. 2009; Frank et al. 2014; Faber et al. 2019). Die in Deutschland vorkommenden Hantaviren können in schweren Krank-

heitsverläufen beim Menschen mit Fieber und einer Einschränkung der Nierenfunktion einhergehen.⁶⁵ Insbesondere das Puumala-Virus (Reservoir: Rötelmaus, *Myodes glareolus*) und im Nordosten das Dobrava-Virus (Reservoir: Brandmaus, *Apodemus agrarius*) sind für den Menschen von Bedeutung (Maier et al. 2003; Stark et al. 2009; Faber et al. 2019). Die Infektion des Menschen erfolgt über die Inhalation virushaltiger Aerosole, die von den Mäusen mit Speichel, Urin oder Kot ausgeschieden werden.

Auch die Verbreitung der Krankheitserreger kann klimabeeinflusst sein. Die Klimawirkung „Verbreitung vektorassoziierter Krankheitserreger“ wurde im Rahmen dieser Analyse jedoch nicht zur Bearbeitung ausgewählt, weshalb hier nicht näher auf sie eingegangen wird.

Zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Verbreitung, Abundanz und Aktivität von möglichen Vektoren wird intensiv geforscht, auch von Seiten der Bundesbehörden und -institutionen des Behördennetzwerks. Im Auftrag und unter wissenschaftlicher Betreuung des UBA wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf das Vorkommen, die Verbreitung und Aktivität von Schildzecken in interdisziplinären Projekten untersucht (FKZ 200 61 218/11, FKZ 3708 49 400, FKZ 3711 48 402, FKZ 3713 48 402) und zu exotischen Stechmückenarten (FKZ 3711 48 404, FKZ 3714 48 4080 (BNITM⁶⁶)) geforscht. Außerdem wurden die Folgen des Klimawandels für die Population krankheitsübertragender Nagetiere untersucht (zum Beispiel FKZ 3713 48 401 (JKI und FLI⁶⁷), FKZ 3716 48 4310 (JKI)). Im RKI und am BNITM wird zu den von den Vektoren übertragenen Krankheitserregern gearbeitet (zum Beispiel Frank et al. 2014, Stark et al. 2009 und FKZ 3717 48 4320), und EBA/DZSF⁶⁸ untersucht aktuell im Rahmen des BMVI-Experten-netzwerks⁶⁹ die Bedeutung von Verkehrsinfrastruktur für die Einschleppung und mögliche Ausbreitung bisher in Deutschland nicht heimischer Stechmückenarten (Projektnummer 2018-U9-1217).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Beispielhaft soll im Folgenden auf die Rötelmaus und den Gemeinen Holzbock eingegangen werden, da sie in Deutschland vergleichsweise bedeutende Vektoren sind.

Rötelmaus: Mehrere Untersuchungen zeigen, dass die Abundanz der Rötelmaus stark von der Buchenmast abhängt, weil Bucheckern eine bedeutende Nahrungsquelle für die Mäuse sind (unter anderem Imholt et al. 2015; Imholt et al. 2017; Reil et al. 2018). Steht aufgrund einer Buchenmast, während der Buchen besonders viele Samen ausbilden, besonders viel Futter zur Verfügung, vermehrt sich die Rötelmaus im kommenden Jahr früher (manchmal schon im Winter) und stärker. Mit der Populationsdichte (infizierter) Rötelmäuse steigt die Infektionsgefahr für den Menschen (Reil et al. 2015). Ob die Rötelmauspopulation ansteigt, hängt neben der Nahrungsverfügbarkeit auch an der Witterung im Winter und Frühjahr. Warme oder auch schneereiche Winter sowie ein trockenes und warmes Frühjahr begünstigen die Überlebensbedingungen. Für die Abundanz der Rötelmaus ist die Buchenmast aber der wichtigste klimabeeinflusste Faktor.

Ob ein Buchenmastjahr eintritt, hängt mit den Witterungsbedingungen im Vorjahr zusammen. Insbesondere ein warmer und trockener Juli begünstigen die Fruktifikation der Buche im kommenden Jahr (Hilton und Packham 1997; Imholt et al. 2015). Bereits jetzt ist eine Häufung der

⁶⁵ Siehe auch: https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_Hantaviren.html#doc2397634bodyText9

⁶⁶ BNITM = Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin

⁶⁷ JKI = Julius-Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen; FLI = Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit

⁶⁸ DZSF = Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (am EBA angesiedelt)

⁶⁹ Siehe auch: <https://www.bmvi-expertennetzwerk.de>

Buchmastjahre zu beobachten. Während früher (auch in der Bezugsperiode der KWRA 2021) eine Vollmast⁷⁰ alle fünf bis zehn Jahre üblich war, haben die Bäume in Deutschland in den letzten Jahren fast durchgängig alle zwei Jahre mindestens mittelstark fruktifiziert (Reil et al. 2015; BMEL 2017; Reil et al. 2017). Diese Entwicklung wird auf die globale Erwärmung sowie die hohen Stickstoffeinträge in die Waldböden zurückgeführt (BMEL 2017). Mit der inzwischen erreichten Frequenz von Buchenmastjahren ist aber möglicherweise bereits eine Obergrenze erreicht, da die Buchen viel Energie in die Mast investieren müssen. Ferner ist davon auszugehen, dass mit erhöhter Frequenz der Mast die mit diesen Masten erreichte Fruchtbiomasse begrenzt ist. Für die Zukunft könnte dies bedeuten, dass sich der Zyklus von Mastjahren möglicherweise gar nicht mehr in der Populationsentwicklung der Rötelmäuse niederschlägt, sondern ein Kontinuum im Nahrungsangebot entsteht.

Gemeiner Holzbock: Wie die Witterung die Abundanz, Entwicklung und Aktivität der Schildzecken bestimmt, wurde seit 2008 in Deutschland im Auftrag des UBA intensiv untersucht (Kahl et al. 2016; Gethmann et al. 2020). Viele Faktoren spielen direkt oder indirekt eine Rolle. So stehen den Zecken, wenn die Zahl der Kleinnager nach Eichen- oder Buchenmastjahren zunimmt, mehr Wirtstiere zur Verfügung (Brugger et al. 2018). Doch ist das Wirtsspektrum der Zecken groß, so dass die Zeckendichte nicht ausschließlich aus der Nagerdichte abgeleitet werden kann. Milde Winter begünstigen die Überlebensbedingungen für Zecken und Verlängern deren Aktivitätsperiode in Herbst und Frühjahrsmonaten, auch in Wintermonaten wurden aktive Zecken nachgewiesen (Kahl et al. 2016; Gethmann et al. 2020). Plötzlicher tiefer Frost aber kann aktiven Populationen sehr schaden. Heiße und trockene Sommer können die Population verkleinern und die Zeckenaktivität verringern, jedoch bieten Eichen-Buchen-Mischwälder, wie sie im Zuge des Waldumbaus vermehrt gepflanzt werden, optimale Biotope für *Ixodes ricinus* (Kahl et al. 2016). Die Untersuchungen von Brugger et al. (2017) und Brugger et al. (2018) zeigen, dass für die Projektion der Zeckenpopulation Daten zum Klima, zum Vorkommen von Wirtstieren sowie Kenntnisse zum Lebensraum erforderlich sind. Insbesondere da *Ixodes ricinus* in Deutschland bereits flächendeckend verbreitet ist, wurde eine deutschlandweite Projektion für den vorliegenden Bericht nicht vorgenommen. Grundsätzlich wird aber davon ausgegangen, dass sich die Bedingungen für Schildzecken mit dem Klimawandel verbessern werden (Kahl et al. 2016).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 71: „Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		hoch		gering	

Kernaussagen zu „Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren“

- ▶ Viele Vektoren und Reserviertiere werden in ihrer Verbreitung, Abundanz und Aktivität von Witterung und Klima beeinflusst. Unter den heimischen Vektoren könnten insbesondere die Schildzecken vom Klimawandel profitieren. Dies würde sich unter anderem in einer Verlängerung ihrer Aktivitätsperiode äußern oder in der weiteren Verbreitung und Zunahme der Abundanz bisher weniger verbreiteter Schildzeckenarten.

⁷⁰ Eine Vollmast tritt ein, wenn die meisten Bäume eines Bestandes besonders reichlich fruchten. Zwischen den Jahren mit Vollmast gibt es Jahre mit Halbmast, Sprengmast und Fehlmast (Konnert 2014).

- ▶ Relevant könnte darüber hinaus die zunehmende Verbreitung bisher nicht einheimischer Vektoren sein. Ihre Einschleppung nach Deutschland ist häufig internationalen Transportwegen wie Personen- und Warenverkehr geschuldet. Auch Wirtstiere können Vektoren einschleppen. Mit dem Klimawandel können sich Gunsträume für nicht-heimische Arten erweitern, sodass eine Etablierung dieser Arten begünstigt wird.

4.2.6 Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)

Hintergrund und Stand der Forschung

Nach einer Studie von Lelieveld et al. (2019) sterben jährlich knapp 124.000 Menschen in Deutschland vorzeitig an den Folgen von Luftverschmutzung. Vor allem Feinstaub, Stickstoffoxide und Ozon stellen dabei ein Gesundheitsrisiko dar. Sie reizen Schleimhäute und Atemwege. Kleinste Partikel dringen bis in die Lunge vor und können dort Entzündungen verursachen, die Asthma, Lungentumore und andere Lungenkrankheiten zur Folge haben können (Schulz et al. 2018; ELF und HEAL 2021). Auch Herz-Kreislaufkrankungen können ihre Ursache in Luftverschmutzung haben. Zwar hat sich die lufthygienische Situation in Deutschland in den letzten Jahrzehnten deutlich verbessert (Heinrich 2018; Minkos et al. 2019), doch lassen sich in Langzeitstudien selbst für geringfügige Schadstoffkonzentrationen Gesundheitsschäden nachweisen (Beelen et al. 2014). So lässt sich für Feinstaub beispielsweise keine Konzentrationsschwelle angeben, unterhalb derer kein nachteiliger Effekt zu erwarten ist (Pavlik et al. 2016). Darüber hinaus gelingt es vielen Städten und Regionen in Deutschland derzeit nicht, die europäischen Grenzwerte zu Luftschadstoffbelastungen einzuhalten (Schulz et al. 2017; Minkos et al. 2019). Für bodennahe Ozon wird sogar ein Anstieg der Hintergrundbelastung in städtischen Räumen beobachtet (UBA 2019c).

Der Klimawandel wirkt sich auf unterschiedliche Weise auf die Konzentration von Luftschadstoffen aus. So kann der Klimawandel indirekt die Emissionen von Luftschadstoffen und ihren Vorläuferstoffen verändern. Führt das veränderte Klima beispielsweise zu einem steigenden Energieverbrauch (etwa für Kühlung; siehe „Bedarf an Kühlenergie“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“) und diese Energie wird durch Verbrennungsprozesse gewonnen, können die Emissionen von Feinstaub und Stickstoffoxiden steigen. Umgekehrt kann ein sinkender Energieverbrauch (etwa durch geringeres Heizen in milden Wintern; siehe „Bedarf an Heizenergie“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“) die genannten Emissionen senken. Trockenheit kann die Feinstaubbelastung erhöhen, etwa, wenn sie Waldbrände verursacht oder die Böden austrocknet, sodass die Deflation zunimmt. Darüber hinaus entstehen manche Luftschadstoffe wie das bodennahe Ozon durch chemische Prozesse in der Luft. Diese Prozesse werden durch zunehmende Sonneneinstrahlung direkt verstärkt. Die Windverhältnisse haben ebenfalls einen Einfluss auf die Schadstoffkonzentration in der Luft. Ist mit der Zunahme der Zahl heißer Tage eine Zunahme der Zahl windstillen Tage verbunden, könnte das die Zahl der Tage erhöhen, an denen in Gebieten, in denen viele Schadstoffe emittiert werden, die Konzentration dieser Schadstoffe in der Luft überdurchschnittlich hoch ist.

Für die Konzentration von bodennahem Ozon in der Luft ist neben der Sonnenstrahlung als Energielieferant für die Umwandlungsprozesse die Verfügbarkeit von Vorläuferstoffen ein wichtiger Einflussfaktor. Illustriert werden soll dies am Beispiel der Ozonwerte der Sommer 2018 und 2019. Der Sommer 2018 war mit einer bundesweiten Durchschnittstemperatur von 19,3 Grad Celsius einer der wärmsten seit Beginn regelmäßiger Messungen im Jahr 1881 (DWD 2018). Der Sommer 2019 war mit einer Durchschnittstemperatur von 19,2 Grad Celsius ebenfalls sehr warm (DWD 2019b). Mit 755 Sonnenstunden war er aber etwas weniger sonnig als der

Sommer 2018 (rund 770 Sonnenstunden; DWD 2019b). Trotzdem wurde im Jahr 2019 der Informationsschwellenwert für Ozon, bei dessen Überschreitung schon bei kurzfristiger Exposition ein Risiko für die Gesundheit besonders empfindlicher Bevölkerungsgruppen besteht (39. BImSchV zuletzt geändert Art. 112 V v. 2020 I 1328), häufiger als im Jahr 2018 überschritten. Auch die Ozonspitzenwerte waren im Sommer 2019 deutlich höher als 2018 (UBA 2019a). Möglicherweise ist die geringere Ozon-Belastung im Jahr 2018 darauf zurückzuführen, dass die Produktion pflanzlicher Vorläuferstoffe (in Form von flüchtigen organischen Verbindungen) für Ozon aufgrund der Trockenheit drastisch reduziert war (Dauert 2019; Minkos et al. 2019). Denn auch wenn beide Jahre trocken waren, war der Dürrestress für Pflanzen 2018 größer als 2019 (DWD 2018; DWD 2019b).

Für die meisten Luftschadstoffe gilt, dass städtische Räume stärker belastet sind als ländliche Räume, mit Ausnahme von bodennahem Ozon (Minkos et al. 2019). Einfluss auf die Schadstoffbelastung hat auch das Gelände: Kessellagen, wie sie in Stuttgart zu finden sind, behindern den Abtransport von Schadstoffen (Schultz et al. 2017). Wirken Luftschadstoffe in Kombination mit Hitze (ebenfalls ein Phänomen, von dem Städte in besonderem Maße betroffen sind), so nehmen Herz-Kreislaufkrankungen zu (Bunz und Mücke 2017). Zusätzlich führt heiße und trockene Luft dazu, dass die Schleimhäute austrocknen, die Atemwege gereizt werden und sich der allgemeine Gesundheitszustand von Patienten mit chronischen Atemwegserkrankungen verschlechtert (Bunz und Mücke 2017). Ist an sehr warmen Tagen die Luftzirkulation gering, hat das negative Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung (Liebers und Witt 2018). Bereits heute lässt sich erkennen, dass an diesen Tagen die Zahl der Notfälle aufgrund von Atemwegserkrankungen signifikant steigt; vor allem in Gegenden mit üblicherweise niedrigen Sommertemperaturen lässt sich dieser Anstieg beobachten (Liebers und Witt 2018).

Besonders sensitive Bevölkerungsgruppen für schädigende Wirkungen an den Atemorganen sind ältere Menschen, Kinder und Ungeborene (Zhang et al. 2019). Auch Personen mit chronischen Atemwegserkrankungen reagieren besonders empfindlich auf Luftverschmutzung. Als Risikogruppe für Ozonwirkungen gelten allgemein Menschen, die viel im Freien sind und sich damit einer höheren Schadstoffmenge aussetzen (Capellaro und Sturm 2015a). Dies gilt insbesondere bei erhöhter körperlicher Belastung zum Beispiel durch Arbeit oder Sport.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf mit Atembeschwerden verbundene Krankheiten sind Thema aktueller Forschung. Im Auftrag des UBA untersucht das Forschungsprojekt „Einfluss des Klimawandels auf die saisonale Morbidität und Mortalität von Atemwegserkrankungen“ des Zentrums für Medizin-Meteorologische Forschung Freiburg (ZMMF) des Deutschen Wetterdienstes derzeit die Belastung des menschlichen Organismus und insbesondere die Folgen für Atemwegserkrankungen unter verschiedenen Szenarien des Klimawandels.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Das im Luftreinhalteprogramm der Bundesregierung beschriebene Mit-Maßnahmen-Szenario, das bereits beschlossene Maßnahmen in den Bereichen Luftreinhaltung und Klimaschutz berücksichtigt⁷¹, geht bis 2030 von einer deutlichen Reduzierung der Emissionen von Stickstoffoxiden, flüchtigen organischen Verbindungen (Vorläuferstoffen für bodennahes Ozon) und Feinstaub aus (BMU 2019). Dies führt den im Luftreinhalteprogramm beschriebenen Modellierungen zufolge zu einer sinkenden Hintergrundkonzentration von Stickstoffoxiden und Feinstaub. Die für das Jahr 2030 modellierten Jahresmittelwerte der Ozonkonzentration hingegen sind höher als jene des Vergleichsjahres 2005 (BMU 2019).

⁷¹ Berücksichtigt werden Maßnahmen, die im Bereich Klimaschutz bis zum 31.07.2016 und im Bereich Luftreinhaltung bis zum 01.09.2017 verabschiedet wurden.

Liebers und Witt (2018) gehen trotz der Bemühungen zur Luftreinhaltung davon aus, dass die gesundheitlichen Risiken durch Luftverschmutzung in Innenstädten künftig weiter zunehmen werden. Sie begründen dies unter anderem mit der geringen Luftzirkulation an Tagen mit hoher Lufttemperatur, zunehmenden Emissionen von Feinstäuben und Stickoxiden durch einen gestiegenen Energieverbrauch für Transport und Kühlung sowie einer zunehmenden Ozonproduktion aufgrund der erhöhten Sonneneinstrahlung. Zunehmende Trockenheit und mitunter auch Waldbrände (siehe „Waldbrandrisiko“ im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“) könnten ebenfalls zu einer Erhöhung der Hintergrundkonzentration von Feinstaub im Sommer beitragen (Liebers und Witt 2018). Die Auswertungen des Forschungsvorhabens KLENOS⁷² des UBA, in dem für die Mitte des Jahrhunderts Klimaprojektionen mit Annahmen zur Emissionsentwicklung zusammengeführt wurden, bestätigt leichte Zunahmen der Ozonkonzentration in Ballungsräumen (Pavlik et al. 2016). Für ländliche Regionen wird aufgrund von Emissionsminderungen bei den Vorläuferstoffen mit einer Abnahme der mittleren Ozonkonzentration gerechnet, insbesondere im Süden Deutschlands (Pavlik et al. 2016). Forkel und Knoche (2006) hingegen erwarten – für den süddeutschen Raum und unter Annahme einer durchschnittlichen Erwärmung von zwei Grad Celsius in den 2030er Jahren verglichen mit den 1990er Jahren – eine Zunahme der durchschnittlichen täglichen Ozonmaxima im Sommer. Neben diesen Luftschadstoffen könnte die Veränderung der Dauer und Intensität der Pollenbelastung (siehe 4.2.2) für eine zusätzliche gesundheitliche Belastung von Personen mit allergiebedingten Atemwegs- oder Lungenerkrankungen sorgen.

Es gibt auch gegenläufige Trends: Im Winter ist aufgrund der Heizperiode die Feinstaubkonzentration derzeit besonders hoch. Werden die Winter milder, wird möglicherweise weniger geheizt. Der Feinstaub könnte im Winter zudem aufgrund zunehmender Niederschlagsmengen verstärkt aus der Luft ausgewaschen werden, womit sich die Feinstaubbelastung reduzieren würde (Pavlik et al. 2016; Schultz et al. 2017).

Auch die zukünftige sozioökonomische Entwicklung spielt eine wichtige Rolle: Bleibt die Bedeutung privater Personenkraftwagen (Pkw) für die Mobilität in Deutschland konstant, ist bei einer wachsenden Bevölkerung ein größerer Pkw-Bestand in Zukunft zu erwarten. Dies zeigen die für die KWRA 2021 gerechneten sozioökonomischen Szenarien – sowohl das Trendszenario als Business-as-usual-Szenario als auch das technikaffine Dynamikszenario (GWS 2019). Reifenabrieb ist eine wichtige Feinstaubquelle. Wenn alternative Kraftstoffe wie Gas und Strom nur langsam an Bedeutung gewinnen, wird die überwiegende Zahl der zukünftigen PKW-Flotte zudem voraussichtlich weiterhin Benzin oder Diesel als Kraftstoff nutzen, mit deutlichen Auswirkungen auf die Luftqualität (GWS 2019).

⁷² KLENOS - Einfluss einer Änderung der Energiepolitik und des Klimas auf die Luftqualität sowie Konsequenzen für die Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und Prüfung weitergehender emissionsmindernder Maßnahmen

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 72: „Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)“

- ▶ Der Klimawandel beeinflusst die lokale Schadstoffkonzentration sowie die dadurch entstehende Belastung für sensitive Bevölkerungsgruppen auf vielfältige Weise.
- ▶ Projektionen gehen davon aus, dass die Emission von Luftschadstoffen und Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon bis zur Mitte des Jahrhunderts zurückgehen. Dennoch könnte die Konzentration von bodennahem Ozon in der Luft steigen.
- ▶ Auch die Belastung mit Luftschadstoffen in Innenstädten könnte sich weiter erhöhen, unter anderem aufgrund der zunehmenden Zahl heißer Tage und der damit verbundenen geringeren Luftzirkulation.
- ▶ Werden die Winter milder und nimmt die Feinstaubkonzentration im Sommer in Innenstädten zu, könnten sich die Jahresspitzen der Belastung aus dem Winter in den Sommer verschieben.

4.2.7 Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen

Hintergrund und Stand der Forschung

Wetterbezogene Naturkatastrophen fordern nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (englisch: World Health Organization, WHO) weltweit jährlich etwa 60.000 Menschenleben (WHO 2018). Die meisten Todesfälle werden in Entwicklungsländern beobachtet, doch gibt es auch in Europa extremwetterbedingte Gesundheitsrisiken. Die Europäische Umweltagentur (englisch: European Environment Agency, EEA) berichtete für den Zeitraum 1998 bis 2009 von rund 70.000 Todesfällen als Folge von Naturkatastrophen (EEA 2010). Neben besonders gefährdeten, vulnerablen Gruppen, zu denen unter anderem Kinder, Menschen mit körperlichen Einschränkungen und marginalisierte Bevölkerungsgruppen zählen (Militzer und Kistemann 2018), sind vor allem Personen betroffen, die sich während Extremwettersituationen im Freien aufhalten (Capellaro und Sturm 2015b). Verletzungen und Todesfälle können sowohl direkte als auch indirekte Ursache von Extremereignissen sein. Zu den typischen direkten Folgen von Extremereignissen zählen Frakturen, Verstauchungen und Schnittwunden sowie Tod durch Ertrinken oder physische Gewalteinwirkung (Grewe und Graßl 2010; Augustin et al. 2017). Gesundheitsgefahren aufgrund des Zusammenbruchs kritischer Infrastrukturen wie der Stromversorgung wären ein Beispiel für indirekte Folgen (Birkmann et al. 2017).

Für gesunde Menschen stellen Temperaturextreme in Europa in der Regel keine Gefahr dar, sofern das Verhalten dem Wetter angepasst wird. Für Kleinkinder, ältere Personen und chronisch Kranke aber kann Hitze lebensbedrohlich sein (siehe 4.2.1). Überschwemmungen verursachen seltener Todesfälle, gelten aber – nicht zuletzt aufgrund ihrer wirtschaftlichen Schäden – als bedeutendste Naturgefahr in Europa (EEA 2010). Ursachen für Überschwemmungen können sowohl plötzlich auftretende Starkregenereignisse als auch Hochwasser sein (siehe Handlungsfeld

„Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“). Hochwasser forderte im Zeitraum 1998 bis 2009 nach Angaben der EEA europaweit 1.126 Leben (EEA 2010). Im August 2002 starben bei einem schweren Hochwasser im Einzugsgebiet der Elbe beispielsweise 38 Menschen, 21 davon in Deutschland (IKSE 2004). Laut Kundzewicz und Hattermann (2018) steigt das Risiko für Hochwasserschäden in Deutschland. Als Grund dafür nennen die Autoren unter anderem die Ansiedelung neuer Wohn- und Gewerbegebiete in überschwemmungsgefährdeten Bereichen. Diese Entwicklung erhöht das Risiko für Verletzungen und Todesfälle.

Starkregenereignisse, die Sturzfluten verursachen können, gelten als besonders gefährliches Extremwetterereignis, da sie schwer vorherzusagen sind (Militzer und Kistemann 2018). Werden Niederschlagsereignisse intensiver, können sich Massenbewegungen wie Hangrutschungen häufen (siehe Handlungsfeld „Boden“; EEA 2010; GDV 2015). Auch sie können eine Gefahr für Leib und Leben sein, insbesondere, wenn Siedlungen oder Verkehrsinfrastrukturen beschädigt oder verschüttet werden. Im Jahr 2009 rutschten in Nachterstedt (Sachsen-Anhalt) rund 2,5 Millionen Kubikmeter Erde in einen Tagebausee. Dabei wurden zwei Häuser mitgerissen und drei Menschen starben.

Niederschlag kann auch als Hagel ein Risiko für die menschliche Gesundheit sein, insbesondere bei hohen Fallgeschwindigkeiten und großer Korngröße (Kunz et al. 2018). Im Jahre 2017 forderte ein Hagelsturm zwei Menschenleben, weil er Ursache von Folgeunfällen war (Munich RE 2018). Im Jahr 2017 forderten in Deutschland zudem drei Winterstürme insgesamt 18 Menschenleben (Munich RE 2018). Verletzungen werden während Starkwindereignissen hauptsächlich von herumwirbelnden Gegenständen und umstürzenden Bäumen verursacht (GDV 2018).

Während sich Winterstürme über mehrere hundert bis tausend Kilometer erstrecken können, sind Tornados kleinräumige und kurzlebige Sturmerscheinungen (GDV 2018). Tornados entstehen meist im Kontext von Gewittern. Sie sind wie Starkregenereignisse kaum vorherzusagen (GDV 2018; Lozán et al. 2018). Auch deshalb können sie zu schweren Verletzungen führen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Es lässt sich aus Beobachtungen und Studien schließen, dass Extremwetterereignisse mit dem Klimawandel insgesamt an Intensität und Häufigkeit zunehmen werden (Kunz et al. 2018). Für viele Extremwetterereignisse aber gilt, dass diese Veränderungen nur mit großer Unsicherheit projiziert werden können (Kunz et al. 2018). So lässt sich beispielsweise aufgrund der dekadischen Oszillation und einer deutlichen jährlichen Schwankung der Häufigkeit und Intensität von Stürmen für diese bislang kein eindeutiger Trend erkennen (Feser und Tinz 2018). Auch für Hochwasser zeichnet sich noch kein Trend ab (UBA 2019b), die Projektionen sind zum einen regional sehr unterschiedlich und zum anderen für manche Regionen nicht trendsicher. Im pessimistischen Fall jedoch könnte das mittlere Hochwasser insbesondere der Elbe mit ihren Zuflüssen Havel, Mulde und Saale sowie der Weser stark ansteigen (siehe Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, Kapitel 4.2.2). Winterliche Starkregenereignisse sind bereits häufiger (UBA 2019b) und werden in ihrer Häufigkeit voraussichtlich weiter zunehmen (siehe Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, Kapitel 4.2.4). Auch Hagelschauer (Kunz et al. 2018) nehmen voraussichtlich in ihrer Häufigkeit zu. Sicher ist der Trend bei Hitze (siehe 4.2.1), dieses Temperaturextrem wird ebenfalls häufiger vorkommen und länger andauern. Zu gravitativen Massenbewegungen wie Erdbeben kann eine solche Aussage noch nicht getroffen werden, da der Zusammenhang zum Klimawandel noch nicht abschließend erforscht ist (siehe „Rutschungen und Muren“ im Handlungsfeld „Boden“).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 73: „Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	gering	gering	mittel
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen“

- ▶ Nicht für alle Extremwetterereignisse sind die Projektionen schon eindeutig. Hitzeereignisse aber werden häufiger und intensiver, Starkregenereignisse ebenso. Auch Hagelschauer werden in Zukunft voraussichtlich häufiger auftreten.
- ▶ Mit der zunehmenden Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen steigt die Gefahr, dass sich Menschen verletzen oder getötet werden.
- ▶ Besonders viele Todesfälle verursachen Hitzeextreme.

4.2.8 Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

Hintergrund und Stand der Forschung

Es gibt keine allgemeingültige Definition der Begriffe „Gesundheitssystem“ oder „Gesundheitswesen“. Der Duden definiert das Gesundheitssystem als „(öffentliches) System, nach dem die medizinische Versorgung der Bevölkerung politisch, sozial und finanziell geregelt ist“ (Bibliographisches Institut GmbH 2019). Andere Definitionen wie die von Werding (2018) stellen vor allem die Personen und Organisationen der medizinischen Versorgung in den Mittelpunkt. Das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) sprechen von „Gesundheitswirtschaft“ und meinen damit im Kernbereich vor allem die Produktion und den Vertrieb von Humanarzneimitteln, Medizinprodukten und medizintechnischen Großgeräten, Krankenversicherungen und öffentliche Verwaltung sowie die Dienstleistungen stationärer und nicht-stationärer Einrichtungen (BMWi 2019).

Nur wenige Studien befassen sich mit den Folgen des Klimawandels auf das Gesundheitssystem oder die Gesundheitswirtschaft. Hier ist offenbar weitere Forschung notwendig. Deshalb können an dieser Stelle auch nur einzelne Wirkpfade skizziert werden. Es sollen jene Klimawirkungen hervorgehoben werden, die besondere Herausforderungen für die medizinische Versorgung und das Rettungswesen darstellen. Darüber hinaus können Einrichtungen des Gesundheitssystems und der Gesundheitswirtschaft natürlich von Klimafolgen betroffen sein, wie sie etwa in den Handlungsfeldern „Bauwesen“ sowie „Industrie und Gewerbe“ beschrieben sind. Außerdem ist unbestritten, dass mit dem Klimawandel und seinen in diesem Handlungsfeld beschriebenen Folgen kurzfristig zusätzliche Kosten für das Gesundheitswesen verbunden sind, die zum einen durch die Versorgung von Patientinnen und Patienten, aber auch durch Aufklärungskampagnen, die Anpassung der Infrastruktur und die Schulung von Personal entstehen. Es scheint bisher keine Studie zu geben, die diese Kosten im Ganzen beziffert. Um dennoch einen Eindruck von der möglichen Größenordnung zu geben, soll hier auf die Studie von an der Heiden et al. (2012) verwiesen werden, in der für den Zeitraum 2010 bis 2030 allein aufgrund des demographischen Wandels (der Klimawandel wurde nicht berücksichtigt) kumulierte Investitionskosten zu dama-

ligen Preisen für Neubau und Sanierung von Pflegeplätzen von rund 100 Milliarden Euro errechnet haben. Der demographische Wandel verursacht nach Schätzungen von Kemfert (2007) den größten Teil des Anstiegs der Gesundheitskosten. Nach Berechnungen dieser Studie könnten die durch den Klimawandel hervorgerufenen (hitzebedingten) zusätzlichen Kosten für den Gesundheitssektor bis Mitte des Jahrhunderts bei 61 Milliarden Euro liegen und in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts um weitere 140 Milliarden Euro zunehmen (Kemfert 2007). Zwar beschreibt Kemfert (2007) die ihren Schätzungen zugrunde liegenden Annahmen und die berücksichtigten Faktoren nicht, da jedoch von hitzebedingten Kosten gesprochen wird, kann angenommen werden, dass die Zahlen höher sind, wenn mehr als hitzebedingte Klimafolgen einberechnet werden.

Langfristig könnten die Kosten des Klimawandels für das Gesundheitswesen auch wieder sinken (Stöver 2015), insbesondere wenn Präventionsmaßnahmen erfolgreich umgesetzt werden. Als direkte Schnittstelle zu den am stärksten Betroffenen (alten und chronisch kranken Menschen) kommt den Akteurinnen und Akteuren des Gesundheits- und Sozialwesens für die Prävention eine besondere Rolle zu (siehe beispielsweise Ziolo und Matzarakis 2018). Es ist daher wichtig, dass sich die Organisationen des Gesundheitssystems/der Gesundheitswirtschaft dieses Themas annehmen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Mit den steigenden Temperaturen könnten sich in Deutschland Krankheitserreger etablieren, die hier bisher nicht verbreitet waren. 2019 wurden die ersten fünf mit dem West-Nil-Virus infizierten Fälle in Deutschland bekannt (Frank et al. 2020). Daraus folgt, dass medizinisches Personal in Folge des Klimawandels zusätzliche Kenntnisse zu bisher in Deutschland nicht oder nur selten auftretenden Krankheiten braucht. Auch neue Allergene, ein veränderter Umgang mit Medikamenten und andere gesundheitsrelevante Folgen des Klimawandels können neues oder zusätzliches Wissen erfordern. Der Klimawandel kann auch Anpassungen bei Medikamenten und damit Forschung erfordern (Stöver 2015).

Neue Krankheiten, die Verstärkung bekannter Belastungen und vermehrte Unfälle bei Extremereignissen können insgesamt zu mehr Krankheitsfällen führen. Eine wichtige Akteursgruppe bei der Versorgung Betroffener sind die Krankenhäuser. Ihre Zahl sowie die Anzahl der darin vorgehaltenen Betten sank in den letzten zehn Jahren kontinuierlich (BMW 2019). Weitere Kürzungen sind nicht unwahrscheinlich (Loos et al. 2019). Möglich ist in extremen Situationen eine Überlastung der Krankenhäuser und Rettungsstellen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass manche Extreme nicht nur zu mehr Patienten führen, sondern zeitgleich die Leistungsfähigkeit der Beschäftigten des Gesundheitswesens reduzieren – beispielsweise Hitze, aber auch andere Extreme, wenn das Personal selbst betroffen ist.

Die ambulante Betreuung und Pflege nimmt an Bedeutung zu (BMW 2019). Verbunden damit ist ein höherer Wegeaufwand. Wenn künftig Verkehrsinfrastrukturen aufgrund zunehmender Extremwetterereignisse an Zuverlässigkeit einbüßen (siehe Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“), könnte dies ein Problem für die Verlässlichkeit von Betreuung und Pflege darstellen. Gleiches gilt für das Rettungswesen, das gerade im Fall eines Extremwetters einsatzfähig sein muss (Nikogosian und Krings 2019). Kutschker (2019) schreibt hierzu mit Blick auf Starkregenereignisse: „Das deutsche Feuerwehrwesen wird überwiegend von Freiwilligen Feuerwehren abgebildet, die Einsatzkräfte müssen sich also nach ihrer Alarmierung erst im Feuerwehrhaus einfinden, dies geschieht zumeist mit dem Pkw. Überflutete Straßen, die den Weg zum Feuerwehrhaus versperren, Eigenbetroffenheit im privaten Bereich der Einsatzkräfte, aber auch die Beeinträchtigung der Feuerwehrunterkunft, zum Beispiel durch Überschwemmung der Fahrzeughalle oder Stromausfall im Gebäude, können die Einsatzbereitschaft schwächen und

führen zumindest zu zeitlicher Verzögerung bei der Aufnahme der Einsatz Tätigkeiten“ (sic; Kutschker 2019; S. 11). Für andere Wetterextreme wie Sturm oder Hochwasser sind ähnliche Szenarien denkbar.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 74: „Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		sehr gering	

Kernaussagen zu „Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“

- ▶ Der Klimawandel könnte die Zahl der Krankheitsfälle erhöhen.
- ▶ Zunehmende und intensivere Extremwetterereignisse könnten dazu führen, dass Gesundheitseinrichtungen ihren Aufgaben zeitweise nicht in vollem Umfang nachkommen können, weil sie überlastet sind oder die notwendige Infrastruktur ausfällt.
- ▶ Der Klimawandel erfordert Investitionen in das Gesundheitssystem, insbesondere in Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten, Präventionskampagnen, Forschung und die Zuverlässigkeit von Infrastrukturen.

4.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

4.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ stützt sich auf folgende wesentliche Strategien, Maßnahmen und Instrumente: Wissen- und Informationsverbreitung, einschließlich strukturierter Risikokommunikation (Augustin und Andrees 2020), gesetzlich festgelegte technische Ausstattungsstandards und ein systematisches Monitoring von Umwelteinflüssen (einschließlich Daten zur Konzentration von Aeroallergenen pflanzlicher und tierischer Herkunft, potenzieller Vektoren und Mikroorganismen) sowie Standards für Verhaltensregeln (am Arbeitsplatz und für andere Lebensbereiche) (Reusswig et al. 2016).

Der insgesamt hohen Bedeutung der Gesundheit der Bevölkerung entsprechend sieht auch der „Aktionsplan Anpassung“ eine vergleichsweise große Anzahl und inhaltliche Vielfalt von Maßnahmen und Instrumenten zum Umgang mit den Klimawandelfolgen für die menschliche Gesundheit vor. Die im APA III festgehaltenen Maßnahmen mit Bezug zu den bedeutsamsten Klimawirkungen des Handlungsfelds – Hitzebelastung, UV-bedingte Gesundheitsschädigungen, allergische Reaktionen durch Aeroallergene (siehe 5.2.1, 5.2.2, 5.2.4) – dienen der Schaffung und Verbreitung von Wissen und zielen damit auf die (individuelle und allgemeine) Bewusstseinsbildung über die gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels und auf die Handlungsbereitschaft ab. In diesem Zusammenhang ist, wie im APA III ausgedrückt, auch die Etablierung rechtlicher Rahmenbedingungen von Bedeutung. Außerdem spielen technologisch ausgerichtete Instrumente und Maßnahmen eine wichtige Rolle bei den beschlossenen Maßnahmen (gemäß APA III).

In die Betrachtung der Anpassungskapazität im Gesundheitsbereich sind auch Maßnahmen/Instrumente des APA III einzubeziehen, die noch weitere Klimawirkungen des Handlungsfelds – neben Hitzebelastung, UV-bedingten Gesundheitsschädigungen und allergischen Reaktionen – in

den Blick nehmen. Maßnahmen zur Anpassung an die Ausbreitung möglicher Vektoren, sowohl etablierte als auch neue Krankheitsüberträger, umfassen beispielsweise Monitoringaktivitäten, die Anpassung von Impfempfehlungen (beispielsweise gegen FSME) (APA III: 4.8) (StMUV 2016) sowie die Erforschung von Impfstoffen. Außerdem dient die Ausweisung und regelmäßige Aktualisierung von Risikogebieten (beispielsweise mit Blick auf das Tigermückenvorkommen) (TMUEN 2019) ebenso der Anpassung wie die Durchführung von Trendanalysen bei importierten vektorübertragenen Infektionskrankheiten (zum Beispiel Chikungunya-Virus, Dengue-Virus, Malaria) (APA III: 4.11) und die Erforschung von in Deutschland neu vorkommenden Zeckenarten sowie die vorgesehene Informationsbereitstellung dazu per Online-Plattform (APA III: 4.12). Maßnahmen zum Umgang mit der Ausbreitung potenziell schädlicher Mikroorganismen und Algen sind im Badegewässermonitoring, in der Warnung und Gewässersperrung bei erhöhter Blaualgenbildung (beispielsweise mithilfe eines Online-Informationssystems) und in der Trinkwasserüberwachung zu sehen (TMUEN 2019).

Tabelle 75: Anpassungsmaßnahmen bezogen auf die Klimawirkungen „Ausbreitung und Abundanzveränderung möglicher Vektoren“ und „Ausbreitung potenziell schädlicher Mikroorganismen und Algen“

Klimawirkung	Anpassungsoption
Ausbreitung und Abundanzveränderung möglicher Vektoren	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoring - Anpassung von Impfempfehlungen (bspw. gegen FSME) - Ausweisung und regelmäßige Aktualisierung von Risikogebieten - Durchführung von Trendanalysen bei importierten vektorübertragenen Infektionskrankheiten (zum Beispiel Dengue, Malaria, Chikungunya-Virus)
Ausbreitung potenziell schädlicher Mikroorganismen und Algen	<ul style="list-style-type: none"> - Badegewässermonitoring - Warnung und ggf. Gewässersperrung bei erhöhter Blaualgenbildung - Trinkwasserüberwachung

Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung werden überwiegend in den Bereichen finanzielle Ressourcen und rechtliche Rahmenbedingungen gesehen, insbesondere um teilweise bereits bestehende hilfreiche Anpassungsmaßnahmen flächenhaft zu etablieren und technisch zu verfeinern, aber auch um den Wissensstand zum Klimawandel-Gesundheits-Nexus weiter zu vertiefen und so Anhaltspunkte für gezielte Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren. Beispielsweise sind genauere Kenntnisse zur möglichen Erhöhung der Allergieprävalenz und -intensität durch klimawandelbedingt konkurrenzstärkere und damit weiter verbreitete Neophyten oder heimische Arten erforderlich sowie zu den spezifischen Zusammenhängen und Auswirkungen einer verstärkten Allergiesymptomatik bei Gewitterlagen oder länger anhaltenden Hitzeperioden. Zu Anpassungsmaßnahmen zählt nicht zuletzt auch die Weiter-/Entwicklung von Medikamenten, beispielsweise zur gezielten Behandlung von Allergien und Allergiesymptomatik oder zur Vorbeugung und/oder Behandlung von klimawandelbedingt auch in Deutschland neu oder verstärkt auftretenden Infektionskrankheiten wie dem West-Nil-Fieber und zur weltweiten Eindämmung dieser und ähnlicher Infektionskrankheiten, deren Verbreitung sich infolge des Klimawandels erhöhen könnte (Frank et al. 2014; Tannich 2015).

Die Identifikation und Abschwächung negativer Umwelt- und Klimaeinflüsse auf die menschliche Gesundheit sowie die Klimawandelanpassung des Gesundheitssystems stellen einen Schwerpunkt der Strategie der Bundesregierung zur globalen Gesundheit dar. Im Fokus stehen dabei unter anderem die sektorübergreifende und die internationale Zusammenarbeit zur Verminderung gesundheitlicher Auswirkungen des Klimawandels sowie die Förderung der Forschung in diesem Bereich (BMG 2020).

Die Prozesse auf Bundesebene zum Thema Gesundheit und Klimawandel werden durch vielfältige Beschlüsse der Gesundheitsministerkonferenz und der Arbeits- und Sozialministerkonferenz bereits aufgegriffen (und teilweise wird ihnen schon vorgegriffen). Zu diesen Bemühungen gehört beispielsweise ein Beschluss der Arbeits- und Sozialministerkonferenz aus dem Jahr 2020 über ein zukünftig abgestimmtes strategisches Vorgehen bei der Erstellung von Hitzeaktionsplänen und die Prüfung der Verstetigung des bisherigen Bund-Länder-Behördendialogs „Gesundheit im Klimawandel“ in Form einer offiziellen Bund-Länder-Arbeitsgruppe (ASMK 2020). Dies dient auch der Bearbeitung der Hitzeaktionspläne auf Basis der Handlungsempfehlungen des BMU. Von der Gesundheitsministerkonferenz wird auch die Erstellung von Hitzeaktionsplänen auf kommunaler Ebene innerhalb der kommenden fünf Jahre und in Zusammenarbeit mit relevanten Akteuren als notwendig erachtet (GMK 2020). Weitere Beschlüsse der Gesundheitsministerkonferenz zu Gesundheit und Klimawandel betreffen unter anderem die Erweiterung von Fortbildungsangeboten für Beschäftigte in Heilberufen um das Thema klimawandelbedingt potenziell neu auftretender Erkrankungen sowie eine Aufforderung an die Bundesregierung zur dauerhaften Sicherstellung der Finanzierung eines Vektor-Monitorings über 2022 hinaus und eine Aufforderung an das BMBF und das BMG zur Forschungsförderung im Bereich der Anpassung an Klimawandelfolgen im Gesundheitswesen. Darüber hinaus verdeutlichen Beschlüsse zu den Themen Prävention, Stärkung der klimabezogenen Gesundheitskompetenz, klimafreundliche Verwaltung oder Umweltverträglichkeit von Medizinprodukten die aktiven Klimaanpassungsbemühungen der Länder im Gesundheitssektor (GMK 2020).

Am Umweltbundesamt berät die Kommission „Gesundheitsschädlinge“, der Expertinnen und Experten aus Bundes- und Landesbehörden sowie Universitäten angehören, und deren Geschäftsführung im UBA-Fachgebiet „Gesundheitsschädlinge und ihre Bekämpfung“ angesiedelt ist, zur Vektorsituation in Deutschland, zu Maßnahmen zum nachhaltigen Vektor-Management sowie zu Mitteln und Verfahren zur wirksamen Vektorbekämpfung gemäß §18 Infektionsschutzgesetz. Im UBA-Labor Gesundheitsschädlinge wurden in den vergangenen Jahren Zuchten weiterer bedeutender Vektor-Arten etabliert (Birgit Habedank, UBA FG IV1.4 2021). Überdies erörtert die Kommission Umweltmedizin und Environmental Public Health⁷³, die aus Expertinnen und Experten der Gesundheitswissenschaften, der Umweltepidemiologie und Umweltmedizin zusammengesetzt ist, Aspekte von Klimawandel, Gesundheit und Anpassungskapazität. Darüber hinaus trägt die Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit (KLUG)⁷⁴ dazu bei, klimawandelbezogenes Problembewusstsein im Gesundheitssektor zu schaffen und entsprechende klimaschutz- und -anpassungsorientierte Handlungsbereitschaft zu erzeugen (KLUG 2018).

Transformative Anpassung

Gut geplante und umgesetzte Minderungs- und Anpassungsaktivitäten können eine nachhaltige Entwicklung fördern und Entwicklungspfade eröffnen, die in eine transformative Richtung der Anpassung weisen. Diese beinhaltet grundsätzliche Änderungen, aufgrund derer sich in Umwelt- oder sozialen Systeme völlig neue Muster und Dynamiken ergeben würden (Mahrenholz et al. 2017). In Bezug auf klimawandelbedingt erhöhte Gesundheitsrisiken könnten transformative Anpassungspfade unter anderem in einer deutlichen Änderung des Konsum- und Ernährungsverhaltens bestehen. Dies würde zu einer drastischen Reduzierung von Luftschadstoffen, insbesondere Ammoniak und Stickoxide, beitragen (SRU 2015; Sorg et al. 2021). Damit ließe sich auch der klimawandelbedingt steigenden Hitzebelastung, Allergieprävalenz und -intensität begegnen und Atembeschwerden infolge von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden verringern. Anzuset-

⁷³ Siehe auch: https://www.rki.de/DE/Content/Kommissionen/UmweltKommission/umweltkommission_node.html

⁷⁴ Siehe auch: <https://www.klimawandel-gesundheit.de/>

zen wäre einerseits auf individueller Ebene, andererseits müssten entsprechende regulative Impulse (auf gesetzlicher Ebene) gesetzt werden, da die Minderung der Luftqualität durch Abgase, Feinstaub, Ozon die menschliche Gesundheit in erheblichem Maß beeinträchtigen kann. Einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der lufthygienischen Bedingungen – und ebenfalls zur Minderung der thermischen Belastung und UV-Strahlungsbelastung – in urbanen Verdichtungsräumen können substanzielle Eingriffe in die Siedlungs- und Gebäudegestaltung leisten. Dazu zählen unter anderem die Begrünung von Siedlungsgebieten und Städten oder die Verdrängung von Verbrennungsmotoren-betriebenen Fahrzeugen in städtischen Wohngebieten und Innenstädten durch Elektrofahrzeuge und Radverkehr (Baumüller 2018; BMVI 2018). Weiterhin stellt die konsequente Berücksichtigung einer ausreichenden Frischluftzufuhr (über Luftleitbahnen, die solche Standorte mit dem Umland von verdichteten Siedlungsbereichen verbinden) bei der Ausweisung von Standorten für Krankenhäuser, Rehabilitationszentren, Senioren-/Pflegeeinrichtungen und ähnliche Einrichtungen eine Anpassungsmöglichkeit dar; oder deren Errichtung außerhalb von Verdichtungsgebieten (Ginski et al. 2013; Diepes und Müller 2018; Ahlhelm et al. 2020).

4.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Die hier betrachteten Anpassungsmaßnahmen weisen zum Teil Synergien auf. Beispielsweise kann Beschattung und Begrünung im öffentlichen Raum in Siedlungsgebieten (sofern allergen-arm/allergikerfreundlich) den Umgang mit Hitzebelastung, UV-bedingter Gesundheitsgefährdung, allergischen Reaktionen durch pflanzliche Aeroallergene sowie Atembeschwerden durch Luftverschmutzung erleichtern und damit das Ausmaß dieser Klimawirkungen reduzieren.

Außerdem bestehen Wirkbeziehungen zwischen den hier betrachteten Klimawirkungen und Klimawirkungen anderer Handlungsfelder. Dazu zählen die Intensivierung des Wärmeinseleffekts, der sich auf die thermische Belastung in Verdichtungsräumen auswirkt sowie Leistungseinbußen von Beschäftigten im Zusammenhang mit Hitzebelastung und verändertem Innenraumklima (Handlungsfeld Bauwesen). Weiterhin wirkt sich die Ausbreitung invasiver Arten (Handlungsfeld Biologische Vielfalt) auf die Allergieprävalenz aus. Dementsprechend weisen Anpassungsmaßnahmen/-möglichkeiten in den Handlungsfeldern „Bauwesen“, „Biologische Vielfalt“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und Anpassungsprozesse im Gesundheitswesen Überschneidungen auf. Bauliche und technische Maßnahmen zur Reduzierung des Wärmeinseleffekts, also Gebäudekühlung, Fassadenbegrünung und der Ausbau grüner- und blauer Infrastrukturen in Verdichtungsräumen erleichtern auch den Umgang mit zunehmender Hitzebelastung und zielen auf eine Verringerung der Exposition gegenüber UV-Strahlung ab. Gleichzeitig können Zielkonflikte zwischen Anpassungsmaßnahmen auftreten: So ist zum Beispiel bei Neuanpflanzungen zur Begrünung des öffentlichen Raums und Stabilisierung der Siedlungsvegetation neben der Hitze- und Trockentoleranz auch die Allergenität der Pflanzenarten zu berücksichtigen. Auch bei der Anlage und dem Ausbau blauer Infrastrukturen in Siedlungsgebieten zur Kühlung und bei Konstruktionen zur Aufnahme von Niederschlagswasser, die auch Starkregentauglich sind, wäre sicherzustellen, dass solche Maßnahmen nicht zur Verbreitung potenzieller Vektoren und/oder potenziell schädlicher Mikroorganismen beitragen (zum Beispiel als Brutstätten für Tigermücken) (Baumüller 2018).

4.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Seitens der Raumordnung ist in der Regelung der Flächennutzung durch die Regionalplanung und die Bauleitplanung ein Beitrag zur Anpassungsfähigkeit auch im Gesundheitssektor zu sehen. Insbesondere für die Bauleitplanung ist die Herstellung gesunder Lebens- und Arbeitsverhältnisse verpflichtend. Dementsprechend bedarf es, gerade unter Klimawandelbedingungen,

einer der menschlichen Gesundheit zuträglichen Gestaltung von Siedlungsstrukturen. Als besonders relevant erweist sich dies mit Blick auf Hitzeperioden, Exposition gegenüber UV-Strahlung, Sturzfluten und Hochwasser sowie Siedlungsvegetation. Mithilfe der Bauleitplanung können notwendige Weichen zur Prävention potenziell gesundheitsgefährdender Ereignisse (zum Beispiel Sturzfluten oder Überschwemmungen) und zur Eindämmung bestimmter Gesundheitsgefahren (zum Beispiel Hitzebelastung, Allergiebelastung, UV-Strahlungsbelastung, Ausbreitung von Mikroorganismen) gestellt werden (Weidlich 2019; Ahlhelm et al. 2020).

Der Bevölkerungsschutz unterstützt durch seine Einsatzbereitschaft in Extremwetter-bedingten Notfall- oder Katastrophensituationen die Fähigkeit des Gesundheitswesens, mit klimawandelbedingt steigenden Anforderungen an die medizinische Versorgung umzugehen. Eine Aufstockung der Ressourcen für Rettungsdienste und Katastrophenschutz trüge zur weiteren Stärkung der Anpassungskapazität des Gesundheitssektors, insbesondere gegenüber der zunehmenden Häufigkeit, Dauer und Intensität von Wetterextremen wie Hitzeperioden, Überschwemmungen oder Konvektivereignissen, bei (Reusswig et al. 2016).

4.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 76: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		mittel	mittel	hoch	mittel-hoch	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Hitzebelastung	Klimarisiko	hoch	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft	Klimarisiko	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
UV-bedingte Gesundheitsschädigung	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		sehr gering		
Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		hoch		gering		
Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigung)	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Auswirkungen auf das Gesundheitssystem	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		sehr gering		

Tabelle 77: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung	
		optimistisch	pessimistisch				
		Weiterreichende Anpassung		2020-2030	2031-2060		2071-2100
		optimistisch	pessimistisch				
2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100		
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes ¹	gering-mittel	mittel	mittel	mittel	gering	ja	
		mittel	mittel				
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen							
Hitzebelastung	gering-mittel	mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja	
		mittel	mittel				
UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insb. Hautkrebs)	gering-mittel	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja	
		mittel	mittel				
Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft (zum Beispiel Pollen)	gering-mittel	mittel	mittel	gering	gering	ja	
		mittel	mittel				

¹ Bei der Einschätzung der Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes wurden diejenigen Themenbereiche innerhalb des Handlungsfeldes berücksichtigt, für die unter den Beteiligten aus dem Behördenetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ zum Zeitpunkt der Bewertung die erforderliche Kompetenz vorhanden war. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich die Einschätzungen zur Wirksamkeit der Anpassung und zur Gewissheit der Aussagen auf sehr heterogene Maßnahmensets, die der Anpassung an die Klimarisiken im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ dienen, beziehen. Diese Heterogenität stellte eine Herausforderung bei der Einschätzung der Anpassungskapazität gegenüber den Klimarisiken im Handlungsfeld dar

Tabelle 78: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering	mittel	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Hitzebelastung	hoch	mittel	hoch	mittel-hoch	gering	mittel-hoch	gering	mittel
UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insb. Hautkrebs)	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft (zum Beispiel Pollen)	gering	mittel	hoch	gering	gering	mittel	gering	mittel

4.5 Quellenverzeichnis

39. BImSchV: Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen) vom Zuletzt geändert Art. 112 V v. 19.6.2020 I 1328 (in Bundesgesetzblatt. S. 1065. Ursprünglich gefasst 02.08.2010.

Ahlhelm, I.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Noky, B.; Simon, A.; Riegel, C.; Trum, A.; Altenburg, A.; Janssen, G.; Rubel, C. (2020): Praxishilfe – Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

an der Heiden, I.; Meyrahn, F.; Schweitzer, M.; Großmann, A.; Stöver, B.; Ulrich, P.; Wolter, M. I. (2012): Demografischer Wandel – Auswirkungen auf die Bauwirtschaft durch steigenden Bedarf an stationären und ambulanten Altenpflegeplätzen. 2hm & Associates GmbH Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS).

an der Heiden, M.; Buchholz, U.; Uphoff, H. (2019a): Schätzung der Zahl hitzebedingter Sterbefälle und Betrachtung der Exzess-Mortalität; Berlin und Hessen, Sommer 2018. *Epid Bull* (23), S. 193–202. doi:10.25646/6178.

an der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019b): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsbl* 62 (5), S. 571–579. doi:10.1007/s00103-019-02932-y.

Apalla, Z.; Lallas, A.; Sotiriou, E.; Lazaridou, E.; Ioannides, D. (2017): Epidemiological trends in skin cancer. *Dermatology practical & conceptual* 7 (2), S. 1–6. doi:10.5826/dpc.0702a01.

Arbeits- und Sozialministerkonferenz (ASMK) (2020): Externes Ergebnisprotokoll. der 97. Konferenz der Ministerinnen und Minister, Senatorinnen und Senatoren für Arbeit und Soziales der Länder.

Arnone, E.; Castelli, E.; Papandrea, E.; Carlotti, M.; Dinelli, B. M. (2012): Extreme ozone depletion in the 2010–2011 Arctic winter stratosphere as observed by MIPAS/ENVISAT using a 2-D tomographic approach. *Atmos. Chem. Phys.* 12 (19), S. 9149–9165. doi:10.5194/acp-12-9149-2012.

Augustin, J.; Andrees, V. (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit. *GGW* 20 (1), S. 15–22.

Augustin, J.; Sauerborn, R.; Burkart, K.; Endlicher, W.; Jochner, S.; Koppe, C.; Menzel, A.; Mücke, H.-G.; Herrmann, A. (2017): Gesundheit. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 137–149.

Bais, A. F.; Bernhard, G.; McKenzie, R. L.; Aucamp, P. J.; Young, P. J.; Ilyas, M.; Jöckel, P.; Deushi, M. (2019): Ozone-climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. *Photochem Photobiol Sci* 18 (3), S. 602–640. doi:10.1039/c8pp90059k.

Bais, A. F.; Lucas, R. M.; Bornman, J. F.; Williamson, C. E.; Sulzberger, B.; Austin, A. T.; Wilson, S. R.; Andrady, A. L.; Bernhard, G.; McKenzie, R. L.; Aucamp, P. J.; Madronich, S.; Neale, R. E.; Yazar, S.; Young, A. R.; Grujil, F. R. de; Norval, M.; Takizawa, Y.; Barnes, P. W.; Robson, T. M.; Robinson, S. A.; Ballaré, C. L.; Flint, S. D.; Neale, P. J.; Hylander, S.; Rose, K. C.; Wängberg, S.-Å.; Häder, D.-P.; Worrest, R. C.; Zepp, R. G.; Paul, N. D.; Cory, R. M.; Solomon, K. R.; Longstreth, J.; Pandey, K. K.; Redhwi, H. H.; Torikai, A.; Heikkilä, A. M. (2018): Environmental effects of ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2017. *Photochem Photobiol Sci* 17 (2), S. 127–179. doi:10.1039/c7pp90043k.

Bais, A. F.; McKenzie, R. L.; Bernhard, G.; Aucamp, P. J.; Ilyas, M.; Madronich, S.; Tourpali, K. (2015): Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. *Photochem Photobiol Sci* 14 (1), S. 19–52. doi:10.1039/C4PP90032D.

Baker-Austin, C.; Trinanes, J. A.; Gonzalez-Escalona, N.; Martinez-Urtaza, J. (2017): Non-Cholera Vibrios: The Microbial Barometer of Climate Change. *Trends in microbiology* 25 (1), S. 76–84. doi:10.1016/j.tim.2016.09.008.

- Baker-Austin, C.; Trinanés, J. A.; Salmenlinna, S.; Löfdahl, M.; Siitonen, A.; Taylor, N. G. H.; Martínez-Urtaza, J. (2016): Heat Wave–Associated Vibriosis, Sweden and Finland, 2014. *Emerging Infectious Diseases* 22 (7), S. 1216–1220.
- Baker-Austin, C.; Trinanés, J. A.; Taylor, N. G. H.; Hartnell, R.; Siitonen, A.; Martínez-Urtaza, J. (2013): Emerging *Vibrio* risk at high latitudes in response to ocean warming. *Nature Clim Change* 3 (1), S. 73–77. doi:10.1038/nclimate1628.
- Balas, M.; Weisz, U.; Groß, R.; Nowak, P.; Wallner, P.; Allerberger, F.; Becker, D.; Bürkner, M.; Dietl, A.; Haas, Willi, Knittel, Nina; Maric, G.; Pollhamer, C.; Radlherr, M.; Raml, D.; Raunig, K.; Thaler, T.; Widhalm, T.; Zuvella-Aloise, M. (2018): Maßnahmen mit Relevanz für Gesundheit und Klima. In: APCC 2018 (Hrsg) Gesundheit, Demographie und Klimawandel. – Österreichischer special report (ASR18). Wien. S. 219–272.
- Baldermann, C. (2017): UV-bedingte Erkrankungen vermeiden - Verhältnisprävention stärken. UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst (01), S. 40–44.
- Baldermann, C.; Lorenz, S. (2019): UV-Strahlung in Deutschland: Einflüsse des Ozonabbaus und des Klimawandels sowie Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung. *Bundesgesundheitsbl* 62 (5), S. 639–645. doi:10.1007/s00103-019-02934-w.
- Baldermann, C.; Weiskopf, D. (2020): Verhaltens- und Verhältnisprävention Hautkrebs: Umsetzung und Effektivität. *Der Hautarzt; Zeitschrift für Dermatologie, Venerologie, und verwandte Gebiete* 71 (8), S. 572–579. doi:10.1007/s00105-020-04613-3.
- Bastl, K.; Kmenta, M.; Jäger, S.; Bergmann, K.-C.; 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 (3), S. 269–280. doi:10.1007/s10453-014-9326-6.
- Baumüller, N. (2018): Stadt im Klimawandel. Klimaanpassung in der Stadtplanung: Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente. Städtebau-Institut der Universität Stuttgart. doi:10.18419/OPUS-9821.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie 2016, München.
- Beelen, R.; Raaschou-Nielsen, O.; Stafoggia, M.; Andersen, Z. J.; Weinmayr, G.; Hoffmann, B.; Wolf, K.; Samoli, E.; Fischer, P.; Nieuwenhuijsen, M.; Vineis, P.; Xun, W. W.; Katsouyanni, K.; Dimakopoulou, K.; Oudin, A.; Forsberg, B.; Modig, L.; Havulinna, A. S.; Lanki, T.; Turunen, A.; Oftedal, B.; Nystad, W.; Nafstad, P.; Faire, U. de; Pedersen, N. L.; Östenson, C.-G.; Fratiglioni, L.; Penell, J.; Korek, M.; Pershagen, G.; Eriksen, K. T.; Overvad, K.; Ellermann, T.; Eeftens, M.; Peeters, P. H.; Meliefste, K.; Wang, M.; Bueno-de-Mesquita, B.; Sugiri, D.; Krämer, U.; Heinrich, J.; Hoogh, K. de; Key, T.; Peters, A.; Hampel, R.; Concin, H.; Nagel, G.; Ineichen, A.; Schaffner, E.; Probst-Hensch, N.; Künzli, N.; Schindler, C.; Schikowski, T.; Adam, M.; Phuleria, H.; Vilier, A.; Clavel-Chapelon, F.; Declercq, C.; Grioni, S.; Krogh, V.; Tsai, M.-Y.; Ricceri, F.; Sacerdote, C.; Galassi, C.; Migliore, E.; Ranzi, A.; Cesaroni, G.; Badaloni, C.; Forastiere, F.; Tamayo, I.; Amiano, P.; Dorransoro, M.; Katsoulis, M.; Trichopoulou, A.; Brunekreef, B.; Hoek, G. (2014): Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: An analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *The Lancet* 383 (9919), S. 785–795. doi:10.1016/S0140-6736(13)62158-3.
- Beggs, P. J. (2010): Adaptation to impacts of climate change on aeroallergens and allergic respiratory diseases. *International journal of environmental research and public health* 7 (8), S. 3006–3021. doi:10.3390/ijerph7083006.
- Behmer, J. (2020): Siedlungsflächenprojektion 2045. Teilbericht der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Benmarhnia, T.; Kihal-Talantikite, W.; Ragettli, M. S.; Deguen, S. (2017): Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris: A cluster analysis approach. *The Science of the total environment* 592, S. 288–294. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.102.

- Bergmann, K.-C. (2017): Regionale Verteilung luftgetragener allergener Pollen in 2014 und ihre Risikobewertung bei Erwachsenen mit allergischer Rhinitis durch Pollen im Stadtgebiet von Berlin. *Umwelt & Gesundheit* 01/2017. Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID), Dessau-Roßlau.
- Bergmann, K.-C.; Simoleit, A.; Wagener, S.; Mücke, H.-G.; Werchan, M.; Zuberbier, T. (2013): Verteilung von Pollen und Feinstaub in einem städtischen Ballungsraum am Beispiel der Großstadt Berlin. *Allergo J* 22 (7), S. 471–475. doi:10.1007/s15007-013-0376-9.
- Bergmann, K.-C.; Straff, W. (2015): Klimawandel und Pollenallergie. Wie können Städte und Kommunen allergen Pflanzen im öffentlichen Raum reduzieren? *UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst* (2), S. 5–13.
- Berry, P.; Clarke, K.-L.; Fleury, M. D.; Parker, S. (2014): Human Health. In: F. J. Warren, D. S. Lemmen (Hrsg) *Canada in a changing climate. Sector perspectives on impacts and adaptation*. Ottawa, CA. S. 191–232.
- Bettgenhäuser, K.; Boermans, T.; Offermann, M.; Krechting, A.; Becker, D.; Kahles, M.; Pause, F.; Müller, T. (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. *Climate Change* 10/2011. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Bibliographisches Institut GmbH (Hrsg.) (2019): „Gesundheitssystem, das“ auf Duden online. Download unter <https://www.duden.de/node/57249/revision/57285>. Stand: 09.12.2019.
- Birgit Habedank, UBA FG IV1.4 (2021): Kommission „Gesundheitsschädlinge“ im UBA.
- Birkmann, J.; Greiving, S.; Serdeczny, O. (2017): Das Assessment von Vulnerabilitäten, Risiken und Unsicherheiten. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 267–276.
- Bissolli, P.; Deuschländer, T.; Imbery, F.; Haeseler, S.; Lefebvre, C.; Blahak, J.; Fleckenstein, R.; Breyer, J.; Rocek, M.; Kreienkamp, F.; Rösner, S.; Schreiber, K.-J. (2019): Hitzewelle Juli 2019 in Westeuropa. Neuer nationaler Rekord in Deutschland. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach am Main.
- Bissolli, P.; Müller-Westermeier, G. (2005): Die Witterung der Sommermonate 2002 bis 2004. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg) *Klimastatusbericht 2004: Climate Monitoring from Space – Tornadoklimatologie – Aktuelle Ergebnisse des Klimamonitorings*. Offenbach am Main. S. 159–161.
- Borrell, C.; Marí-Dell'Olmo, M.; Rodríguez-Sanz, M.; Garcia-Olalla, P.; Caylà, J. A.; Benach, J.; Muntaner, C. (2006): Socioeconomic position and excess mortality during the heat wave of 2003 in Barcelona. *European journal of epidemiology* 21 (9), S. 633–640. doi:10.1007/s10654-006-9047-4.
- Bousquet, J.; Agache, I.; Anto, J. M.; Bergmann, K.-C.; Bachert, C.; Annesi-Maesano, I.; Bousquet, P. J.; D'Amato, G.; Demoly, P.; Vries, G. de; Eller, E.; Fokkens, W. J.; Fonseca, J.; Haahtela, T.; Hellings, P. W.; Just, J.; Keil, T.; Klimek, L.; Kuna, P.; Lodrup Carlsen, K. C.; Mösges, R.; Murray, R.; Nekam, K.; Onorato, G.; Papadopoulos, N. G.; Samolinski, B.; Schmid-Grendelmeier, P.; Thibaudon, M.; Tomazic, P.; Triggiani, M.; Valiulis, A.; Valovirta, E.; van Eerd, M.; Wickman, M.; Zuberbier, T.; Sheikh, A. (2017): Google Trends terms reporting rhinitis and related topics differ in European countries. *Allergy* 72 (8), S. 1261–1266. doi:10.1111/all.13137.
- Brennholt, N.; Böer, S.; Heinemeyer, E.-A.; Luden, K.; Hauk, G.; Duty, O.; Baumgarten, A.-L.; Potau Núñez, R.; Rösch, T.; Wehrmann, A.; Markert, A.; Janssen, F.; Schippmann, B.; Reifferscheid, G. (2014): Klimabedingte Änderungen der Gewässerhygiene und Auswirkungen auf das Baggergutmanagement in den Küstengewässern: Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.04. KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-38/2014. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG); Niedersächsisches Landesgesundheitsamt; Landesamt für Gesundheit und Soziales Mecklenburg-Vorpommern; Senckenberg am Meer; Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH); Institut für Ostseeforschung Warnemünde, Koblenz. doi:10.5675/Kliwas_38/2014_3.04.
- Brienen, S.; Walter, A.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M.; Helms, M. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. doi:10.5675/ExpNBS2020.2020.02.

- Brönnimann, S. (2002): Ozon in der Atmosphäre. Verlag Paul Haupt, Bern, CH, Stuttgart, Wien, AT.
- Brönnimann, S.; Hood, L. L. (2004): Low total ozone events over northwestern Europe in the 1950s and 1990s. In: C. S. Zerefos (Hrsg) Ozone. Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium. S. 302–303.
- Brugger, K.; Walter, M.; Chitimia-Dobler, L.; Dobler, G.; Rubel, F. (2017): Seasonal cycles of the TBE and Lyme borreliosis vector *Ixodes ricinus* modelled with time-lagged and interval-averaged predictors. *Experimental & applied acarology* 73 (3-4), S. 439–450. doi:10.1007/s10493-017-0197-8.
- Brugger, K.; Walter, M.; Chitimia-Dobler, L.; Dobler, G.; Rubel, F. (2018): Forecasting next season's *Ixodes ricinus* nymphal density: the example of southern Germany 2018. *Experimental & applied acarology* 75 (3), S. 281–288. doi:10.1007/s10493-018-0267-6.
- Bülow, K.; Ganske, A.; Hüttl-Kabus, S.; Klein, B.; Klein, H.; Löwe, P.; Möller, J.; Schade, N.; Tinz, B.; Heinrich, H.; Rosenhagen, G. (2014a): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse der Klimawandelszenarien für die Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.01. KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-31/2014. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH); Deutscher Wetterdienst (DWD), Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_31/2014_2.01.
- Bülow, K.; Ganske, A.; Hüttl-Kabus, S.; Klein, B.; Klein, H.; Löwe, P.; Möller, J.; Schade, N.; Tinz, B.; Heinrich, H.; Rosenhagen, G. (2014b): Ozeanische und atmosphärische Referenzdaten und Hindcast-Analysen für den Nordseeraum. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.03. KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-30/2014. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH); Deutscher Wetterdienst (DWD), Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_30/2014_1.03.
- Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.) (2019): Was ist optische Strahlung? Download unter http://www.bfs.de/DE/themen/opt/einfuehrung/einfuehrung_node.html. Stand: 11.12.2019.
- Bundesärztekammer (BÄK); Kassenärztliche Bundesvereinigung (KBV) (Hrsg.) (2018): Behörden warnen vor Vibrio-Bakterien in der Ostsee. Download unter <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/96656/Behoerden-warnen-vor-Vibrio-Bakterien-in-der-Ostsee>. Stand: 21.02.2019.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016): Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region. Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen, Bonn.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017): Waldbericht der Bundesregierung 2017, Bonn.
- Bundesministerium für Gesundheit (BMG) (2020): Strategie der Bundesregierung zur globalen Gesundheit. Verantwortung - Innovation - Partnerschaft: Globale Gesundheit gemeinsam gestalten, Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2019): Nationales Luftreinhaltprogramm der Bundesrepublik Deutschland, Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2018): Evaluation der 64 kommunalen Green-City-Pläne. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019): Gesundheitswirtschaft – Fakten & Zahlen, Ausgabe 2018. Ergebnisse der Gesundheitswirtschaftlichen Gesamtrechnung 2018, Berlin.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.
- Bunker, A.; Wildenhain, J.; Vandenberg, A.; Henschke, N.; Rocklöv, J.; Hajat, S.; 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, S. 258–268. doi:10.1016/j.ebiom.2016.02.034.
- Bunz, M. (2016): Psychosoziale Auswirkungen des Klimawandels. Psychosocial effects of climate change. UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst (02/2016), S. 30–37.

- Bunz, M.; Mücke, H.-G. (2017): Klimawandel – physische und psychische Folgen. Bundesgesundheitsbl 60 (6), S. 632–639. doi:10.1007/s00103-017-2548-3.
- Buters, J. T. M.; Alberternst, B.; Nawrath, S.; Wimmer, M.; Traidl-Hoffmann, C.; Starfinger, U.; Behrendt, H.; Schmidt-Weber, C.; Bergmann, K.-C. (2015a): Ambrosia artemisiifolia (ragweed) in Germany - current presence, allergological relevance and containment procedures. Allergo journal international 24, S. 108–120. doi:10.1007/s40629-015-0060-6.
- Buters, J. T. M.; Prank, M.; Sofiev, M.; Pusch, G.; Albertini, R.; Annesi-Maesano, I.; Antunes, C.; Behrendt, H.; Berger, U.; Brandao, R.; Celenk, S.; Galan, C.; Grewling, Ł.; Jackowiak, B.; Kennedy, R.; Rantio-Lehtimäki, A.; Reese, G.; Sauliene, I.; Smith, M.; Thibaudon, M.; Weber, B.; Cecchi, L. (2015b): Variation of the group 5 grass pollen allergen content of airborne pollen in relation to geographic location and time in season. The Journal of allergy and clinical immunology 136 (1), 87-95.e6. doi:10.1016/j.jaci.2015.01.049.
- Capellaro, M.; Sturm, D. (2015a): Evaluation von Informationssystemen zu Klimawandel und Gesundheit. Band 1: Anpassung an den Klimawandel: Evaluation bestehender nationaler Informationssysteme (UV-Index, Hitze-warnsystem, Pollenflug- und Ozonvorhersage) aus gesundheitlicher Sicht – Wie erreichen wir die empfindlichen Bevölkerungsgruppen? Umwelt & Gesundheit 03/2015, Dessau-Roßlau.
- Capellaro, M.; Sturm, D. (2015b): Evaluation von Informationssystemen zu Klimawandel und Gesundheit. Band 2: Anpassung an den Klimawandel: Strategie für die Versorgung bei Extremwetterereignissen. Umwelt & Gesundheit 04/2015, Dessau-Roßlau.
- Castres, P. (2017): Lancet Countdown: EU Policy Briefing.
- Chitimia-Dobler, L.; Schaper, S.; Rieß, R.; Bitterwolf, K.; Frangoulidis, D.; Bestehorn, M.; Springer, A.; Oehme, R.; Drehmann, M.; Lindau, A.; Mackenstedt, U.; Strube, C.; Dobler, G. (2019): Imported Hyalomma ticks in Germany in 2018. Parasites & vectors 12 (1), S. 134. doi:10.1186/s13071-019-3380-4.
- Chuine, I. (2000): A unified model for budburst of trees. Journal of theoretical biology 207 (3), S. 337–347. doi:10.1006/jtbi.2000.2178.
- Corrêa, M. d. P.; Godin-Beekmann, S.; Haeffelin, M.; Bekki, S.; Saiag, P.; Badosa, J.; Jégou, F.; Pazmiño, A.; Mahé, E. (2013): Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over the period 2006 to 2100. Photochem Photobiol Sci 12 (6), S. 1053–1064. doi:10.1039/c3pp50024a.
- Cunze, S.; Leiblein, M. C.; Tackenberg, O. (2013): Range Expansion of Ambrosia artemisiifolia in Europe Is Promoted by Climate Change. ISRN Ecology 2013 (1), S. 1–9. doi:10.1155/2013/610126.
- D'Amato, G.; Cecchi, L.; Liccardi, G. (2008): Thunderstorm-related asthma: Not only grass pollen and spores. The Journal of allergy and clinical immunology 121 (2), 537-538. doi:10.1016/j.jaci.2007.10.046.
- D'Amato, G.; Chong-Neto, H. J.; Monge Ortega, O. P.; Vitale, C.; Ansoategui, I.; Rosario, N.; Haathela, T.; Galan, C.; Pawankar, R.; Murrieta, M.; Cecchi, L.; Bergmann, C.; Ridolo, E.; Ramon, G.; Gonzalez Diaz, S.; D'Amato, M.; Annesi-Maesano, I. (2020): The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens. Allergy. doi:10.1111/all.14476.
- D'Amato, G.; Holgate, S. T.; Pawankar, R.; Ledford, D. K.; Cecchi, L.; Al-Ahmad, M.; Al-Enezi, F.; Al-Muhsen, S.; Ansoategui, I.; Baena-Cagnani, C. E.; Baker, D. J.; Bayram, H.; Bergmann, K.-C.; Boulet, L.-P.; Buters, J. T. M.; D'Amato, M.; Dorsano, S.; Douwes, J.; Finlay, S. E.; Garrasi, D.; Gómez, M.; Haahtela, T.; Halwani, R.; Hassani, Y.; Mahboub, B.; Marks, G.; Michelozzi, P.; Montagni, M.; Nunes, C.; Oh, J. J.-W.; Popov, T. A.; Portnoy, J.; Ridolo, E.; Rosário, N.; Rottem, M.; Sánchez-Borges, M.; Sibanda, E.; Sienna-Monge, J. J.; Vitale, C.; Annesi-Maesano, I. (2015): Meteorological conditions, climate change, new emerging factors, and asthma and related allergic disorders. A statement of the World Allergy Organization. The World Allergy Organization journal 8 (1). Aufsatznummer 25. doi:10.1186/s40413-015-0073-0.
- Damialis, A.; Traidl-Hoffmann, C.; Treudler, R. (2019): Climate Change and Pollen Allergies. In: M. R. Marselle, J. Stadler, H. Korn, K. N. Irvine, A. Bonn (Hrsg) Biodiversity and Health in the Face of Climate Change. Cham, CH. S. 47–66. doi:10.1007/978-3-030-02318-8_3.

- Dauert, U. (2019): Information der AL zur aktuellen Ozonbelastung, Dessau-Roßlau.
- Davies, J. M.; Thien, F.; Hew, M. (2018): Thunderstorm asthma: controlling (deadly) grass pollen allergy. *BMJ* (Clinical research ed.) 360, k432. doi:10.1136/bmj.k432.
- Deutsche Allianz für Klimawandel und Gesundheit e.V. (KLUG) (Hrsg.) (2018): Warum Ärzte und Ärztinnen sich gegen den Klimawandel engagieren sollten. Download unter <https://www.klimawandel-gesundheit.de/materialien/factsheets/factsheet-aerztinnen-und-aerzte/>.
- Deutsche Allianz für Klimawandel und Gesundheit e.V. (KLUG) (Hrsg.) (2019): Über uns. Download unter <https://www.klimawandel-gesundheit.de/gruendungserklaerung/>. Stand: 29.05.2019.
- Deutscher Allergie- und Asthmabund (DAAB) (Hrsg.) (2016): Allergien im Garten? Tipps zur Gartengestaltung für Menschen mit Allergien., Mönchengladbach.
- Deutscher Allergie- und Asthmabund (DAAB) (Hrsg.) (2018): Pollenallergie / Heuschnupfen. Download unter <http://www.daab.de/allergien/pollenallergie-heuschnupfen/>. Stand: 15.03.2018.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2018): Deutschlandwetter im Sommer 2018. Außergewöhnlich warm, trocken und sonnig – viele neue regionale Rekorde. Download unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20180830_deutschlandwetter_sommer.html. Stand: 16.12.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2019a): Anomalie der Sonnenscheindauer. Deutschland Januar 1951 - 2019. Download unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html>. Stand: 11.12.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019b): Deutschlandwetter im Sommer 2019. Sonnenscheinreich und niederschlagsarm – neue Temperaturrekorde. Download unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20190830_deutschlandwetter_sommer2019.html. Stand: 16.12.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2020): Phänologische Jahresstatistik. Erle: Blühbeginn. Download unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaeno_sta/phaenosta.html?nn=16102. Stand: 17.02.2020.
- Diepes, C.; Müller, N. (2018): Klimarelevante Handlungsfelder in der verbindlichen Bauleitplanung – Nutzen deutsche Großstädte den ihnen zur Verfügung stehenden Spielraum für Klimaschutz und Klimaanpassung aus? Eine vergleichende Analyse. *Raumforschung und Raumordnung | Spatial Research and Planning* 76 (5), S. 475–477. doi:10.1007/s13147-018-0542-3.
- Dieterich, C.; Wang, S.; Schimanke, S.; Gröger, M.; Klein, B.; Hordoir, R.; Samuelsson, P.; Liu, Y.; Axell, L.; Höglund, A.; Meier, H. E. Markus (2019): Surface Heat Budget over the North Sea in Climate Change Simulations. *Atmosphere* 10 (5), S. 272. doi:10.3390/atmos10050272.
- Eis, D.; Helm, D.; Laußmann, D.; Stark, K. (2010): Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut (RKI), Berlin.
- El Ghissassi, F.; Baan, R.; Straif, K.; Grosse, Y.; Secretan, B.; Bouvard, V.; Benbrahim-Tallaa, L.; Guha, N.; Freeman, C.; Galichet, L.; Coglianò, V. (2009): A review of human carcinogens—Part D: radiation. *The Lancet Oncology* 10 (8), S. 751–752. doi:10.1016/S1470-2045(09)70213-X.
- El Kelish, A.; Zhao, F.; Heller, W.; Durner, J.; Winkler, J. B.; Behrendt, H.; Traidl-Hoffmann, C.; Horres, R.; Pfeifer, M.; Frank, U.; Ernst, D. (2014): Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen allergenicity: SuperSAGE transcriptomic analysis upon elevated CO₂ and drought stress. *BMC plant biology* 14, S. 176. doi:10.1186/1471-2229-14-176.
- Eleftheratos, K.; Kapsomenakis, J.; Zerefos, C. S.; Bais, A. F.; Fountoulakis, I.; Dameris, M.; Jöckel, P.; Haslerud, A. S.; Godin-Beekmann, S.; Steinbrecht, W.; Petropavlovskikh, I.; Brogniez, C.; Leblanc, T.; Liley, J. B.; Querel, R.; Swart, D. P. J. (2020): Possible Effects of Greenhouse Gases to Ozone Profiles and DNA Active UV-B Irradiance at Ground Level. *Atmosphere* 11 (3), S. 228. doi:10.3390/atmos11030228.
- Endler, C. (2013): Der Pollenflug in naher und ferner Zukunft in Deutschland. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg) Klimastatusbericht 2013. Offenbach am Main. S. 96–97.

- Endler, C. (2017): Die Pollenflugvorhersage vom Deutschen Wetterdienst (DWD). *Phänologie-Journal* (48), S. 1–3.
- Endler, C. (2020): Persönliche Mitteilung zu Datenauswertungen des DWD.
- European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC) (Hrsg.) (2005 - 2019): Vibrio Map Viewer. Download unter <https://e3geoportal.ecdc.europa.eu/SitePages/Vibrio%20Map%20Viewer.aspx>. Stand: 22.03.2019.
- European Environment Agency (EEA) (Hrsg.) (2010): Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe. An overview of the last decade. EEA Technical report 13/2010, Kopenhagen, DK.
- European Environment Agency (EEA) (Hrsg.) (2017): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. EEA Report 1, Luxembourg. doi:10.2800/534806.
- European Environment and Epidemiology Network (E3 Network) (Hrsg.) (2014): ECDC - E3 Geoportal Vibrio Suitability Map.
- European Lung Foundation (ELF); Health and Environment Alliance (HEAL) (Hrsg.) (2021): Luftverschmutzung in Innenräumen und Auswirkungen auf die Lunge. Download unter <https://europeanlung.org/de/information-hub/factsheets/luftverschmutzung-in-innenraeumen-und-auswirkungen-auf-die-lunge/>.
- Faber, M.; Krüger, D. H.; Auste, B.; Stark, K.; Hofmann, J.; Weiss, S. (2019): Molecular and epidemiological characteristics of human Puumala and Dobrava-Belgrade hantavirus infections, Germany, 2001 to 2017. *Euro surveillance: European communicable disease bulletin* 24 (32). doi:10.2807/1560-7917.ES.2019.24.32.1800675.
- Fachübergreifender Arbeitskreis „Bundesweites Pollenmonitoring“ (2019): Perspektiven für ein bundesweites Pollenmonitoring in Deutschland. *Bundesgesundheitsbl* 62 (5), S. 652–661. doi:10.1007/s00103-019-02940-y.
- Feser, F.; Tinz, B. (2018): Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) *Warnsignal Klima. Extremereignisse*. Hamburg. S. 201–206.
- Fontana, M.; Wüthrich, B. (2019): Luftverschmutzung, Klima und Allergien: Zusammenhänge und praktischen Auswirkungen. *Swiss Med Forum* 19 (35-36), S. 580–583. doi:10.4414/smf.2019.08346.
- Forkel, R.; Knoche, R. (2006): Regional climate change and its impact on photooxidant concentrations in southern Germany: Simulations with a coupled regional climate-chemistry model. *J. Geophys. Res.* 111 (D12), S. 2305. doi:10.1029/2005JD006748.
- Fouillet, A.; Rey, G.; Laurent, F.; Pavillon, G.; Bellec, S.; Guihenneuc-Jouyau, C.; Clavel, J.; Jouglu, E.; Hémon, D. (2006): Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International archives of occupational and environmental health* 80 (1), S. 16–24. doi:10.1007/s00420-006-0089-4.
- Fountoulakis, I.; Diémoz, H.; Siani, A.-M.; Laschewski, G.; Filippa, G.; Arola, A.; Bais, A. F.; Backer, H. de; Lakkala, K.; Webb, A. R.; Bock, V. de; Karppinen, T.; Garane, K.; Kapsomenakis, J.; Koukouli, M.-E.; Zerefos, C. S. (2020): Solar UV Irradiance in a Changing Climate: Trends in Europe and the Significance of Spectral Monitoring in Italy. *Environments* 7 (1), S. 1. doi:10.3390/environments7010001.
- Frank, C.; Faber, M.; Hellenbrand, W.; Wilking, H.; Stark, K. (2014): Wichtige, durch Vektoren übertragene Infektionskrankheiten beim Menschen in Deutschland. *Epidemiologische Aspekte. Bundesgesundheitsbl* 57 (5), S. 557–567. doi:10.1007/s00103-013-1925-9.
- Frank, C.; Lachmann, R.; Stark, K.; Schmidt-Chanasit, J.; Eisermann, P.; Lühken, R. (2020): Autochthone Infektionen mit dem West-Nil-Virus in Deutschland 2018 und 2019. *Epidemiologisches Bulletin* (25), S. 3–10. doi:10.25646/6943.
- Gabriel, K. (2009): Gesundheitsrisiken durch Wärmebelastung in Ballungsräumen. Eine Analyse von Hitzewellen-Ereignissen hinsichtlich der Mortalität im Raum Berlin-Brandenburg. Dissertation, Berlin.
- Gabrysch, S. (2018): Imagination challenges in planetary health: re-conceptualising the human-environment relationship. *The Lancet* (2), S. 372–373.

- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2015): Naturgefahren: Klimawandel erhöht die Gefahr von Erdbeben. Download unter <https://www.gdv.de/de/themen/news/klimawandel-erhoeht-die-gefahr-von-erdrutschen-19012>.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2018): Naturgefahrenreport 2018. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.
- Gesellschaft der epidemiologischen Krebsregister in Deutschland (GEKID) (Hrsg.) (2017): GEKID-Atlas. Download unter <http://atlas.gekid.de/CurrentVersion/atlas.html>. Stand: 11.12.2019.
- Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) (Hrsg.) (2019): Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland. Sozioökonomische Kennzahlen - Supplement zum Verkehrsbereich.
- Gesundheitsministerkonferenz (GMK) (Hrsg.) (2020): Beschlüsse der 93. GMK (2020). TOP: 5.1 Der Klimawandel - eine Herausforderung für das deutsche Gesundheitswesen. Download unter <https://www.gmkonline.de/Beschluesse.html?id=1018&jahr=2020>. Stand: 17.05.2021.
- Gethmann, J.; Hoffmann, B.; Kasbohm, E.; Süß, J.; Habedank, B.; Conraths, F. J.; Beer, M.; Klaus, C. (2020): Research paper on abiotic factors and their influence on Ixodes ricinus activity-observations over a two-year period at several tick collection sites in Germany. Parasitology research. doi:10.1007/s00436-020-06666-8.
- Ginski, S.; Klemme, M.; Pfaffenbach, C.; Siuda, A. (2013): Anpassung durch Akzeptanz – Der Umgang lokaler Akteure mit sommerlicher Hitze. disP - The Planning Review 49 (2), S. 86–100. doi:10.1080/02513625.2013.827514.
- Gömann, H.; Frühauf, C.; Lüttger, A.; Weigel, H.-J. (2017): Landwirtschaft. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 183–192.
- Graw, K.; Grätz, A.; Matzarakis, A. (2019): Die Bioklimakarte von Deutschland: Zeitraum 1981 bis 2000. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 79 (7/8), S. 269–275.
- Grewe, H. A.; Blättner, B. (2020): Systematischer Gesundheitsschutz bei Hitzeextremen. Public Health Forum 28 (1), S. 33–36. doi:10.1515/pubhef-2019-0123.
- Grewe, H. A.; Graßl, H. (2010): Arbeitsgruppe Wind und Wasser. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg) Klimawandel, Extremwetterereignisse und Gesundheit. Internationale Fachkonferenz, Konferenzbericht. Bonn. S. 25–29.
- Grundström, M.; Dahl, Å.; Ou, T.; Chen, D.; Pleijel, H. (2017): The relationship between birch pollen, air pollution and weather types and their effect on antihistamine purchase in two Swedish cities. Aerobiologia 33 (4), S. 457–471. doi:10.1007/s10453-017-9478-2.
- Hackenbruch, J. (2018): Anpassungsrelevante Klimaänderungen für städtische Baustrukturen und Wohnquartiere. Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie 77. Kottmeier, Christoph, Karlsruhe.
- Haftenberger, M.; Laußmann, D.; Ellert, U.; Kalcklösch, M.; Langen, U.; Schlaud, M.; Schmitz, R.; Thamm, M. (2013): Prevalence of sensitisation to aeroallergens and food allergens: Results of the German Health Interview and Examination Survey for Adults (DEGS1). Bundesgesundheitsbl 56 (5-6), S. 687–697. doi:10.1007/s00103-012-1658-1.
- Hagedorn, P. (2019): Fund von Zecken der Gattung Hyalomma in Deutschland. Epid Bull 16 (7), S. 70–71. doi:10.25646/5893.
- Health Canada (Hrsg.) (2011): Adapting to extreme heat events: Guidelines for assessing health vulnerability. Health Canada, Ottawa, CA.
- Heinrich, J. (2018): Feinstaub, Stickoxide, Ozon: Darf man in Großstädten noch atmen? Der Pneumologe 15 (4), S. 263–265. doi:10.1007/s10405-018-0192-8.

- Heng, S.-P.; Letchumanan, V.; Deng, C.-Y.; Ab Mutalib, Nurul-Syakima; Khan, T. M.; Chuah, L.-H.; Chan, K.-G.; Goh, B.-H.; Pusparajah, P.; Lee, L.-H. (2017): *Vibrio vulnificus*: An Environmental and Clinical Burden. *Frontiers in microbiology* 8, S. 997. doi:10.3389/fmicb.2017.00997.
- Hilton, G. M.; Packham, J. R. (1997): A sixteen-year record of regional and temporal variation in the fruiting of beech (*Fagus sylvatica* L.) in England (1980-1995). *Forestry* 70 (1), S. 7–16. doi:10.1093/forestry/70.1.7.
- Hlady, W. G.; Klontz, K. C. (1996): The Epidemiology of *Vibrio* Infections in Florida, 1981-1993. *Journal of Infectious Diseases* 173 (5), S. 1176–1183. doi:10.1093/infdis/173.5.1176.
- Hobe, M. von; Bekki, S.; Borrmann, S.; Cairo, F.; D'Amato, F.; Di Donfrancesco, G.; Dörnbrack, A.; Ebersoldt, A.; Ebert, M.; Emde, C.; Engel, I.; Ern, M.; Frey, W.; Genco, S.; Griessbach, S.; Groß, J.-U.; Gulde, T.; Günther, G.; Hösen, E.; Hoffmann, L.; Homonnai, V.; Hoyle, C. R.; Isaksen, I. S. A.; Jackson, D. R.; János, I. M.; Jones, R. L.; Kandler, K.; Kalicinsky, C.; Keil, A.; Khaykin, S. M.; Khosrawi, F.; Kivi, R.; Kuttippurath, J.; Laube, J. C.; Lefèvre, F.; Lehmann, R.; Ludmann, S.; Luo, B. P.; Marchand, M.; Meyer, J.; Mitev, V.; Molleker, S.; Müller, R.; Oelhaf, H.; Olschewski, F.; Orsolini, Y.; Peter, T.; Pfeilsticker, K.; Piesch, C.; Pitts, M. C.; Poole, L. R.; Pope, F. D.; Ravegnani, F.; Rex, M.; Riese, M.; Röckmann, T.; Rognerud, B.; Roiger, A.; Rolf, C.; Santee, M. L.; Scheibe, M.; Schiller, C.; Schlager, H.; Siciliani de Cumis, M.; Sitnikov, N.; Søvde, O. A.; Spang, R.; Spelten, N.; Stordal, F.; Sumińska-Ebersoldt, O.; Ulanovski, A.; Ungermann, J.; Viciani, S.; Volk, C. M.; vom Scheidt, M.; Gathen, P. von der; Walker, K.; Wegner, T.; Weigel, R.; Weinbruch, S.; Wetzel, G.; Wienhold, F. G.; Wohltmann, I.; Woiwode, W.; Young, I. A. K.; Yushkov, V.; Zobrist, B.; Stroh, F. (2013): Reconciliation of essential process parameters for an enhanced predictability of Arctic stratospheric ozone loss and its climate interactions (RECONCILE): activities and results. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13 (18), S. 9233–9268. doi:10.5194/acp-13-9233-2013.
- Höflich, C. (2016): Allergische Sensibilisierung gegen Pflanzen mit Klimawandelassoziiertem Ausbreitungspotenzial: Ergebnisse aus zwei deutschen Bundesländern mit unterschiedlichem Regionalklima. Endbericht. *Umwelt & Gesundheit* 03/2016, Dessau-Roßlau.
- Höflich, C. (2018): Pollen-assoziierte allergische Erkrankungen in Zeiten des Klimawandels. Neue Daten zur Entwicklung in Deutschland. *UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst* (01), S. 5–14.
- Huber, V.; Krummenauer, L.; Peña-Ortiz, C.; Lange, S.; Gasparrini, A.; Vicedo-Cabrera, A. M.; Garcia-Herrera, R.; Frieler, K. (2020): Temperature-related excess mortality in German cities at 2 °C and higher degrees of global warming. *Environmental research* 186. doi:10.1016/j.envres.2020.109447.
- Hübler, M. (2014): Sozio-ökonomische Bewertung von Gesundheitseffekten des Klimawandels in Deutschland. In: J. L. Lozán, H. Graßl, G. Jendritzky, L. Karbe, K. Reise (Hrsg.) *Warnsignal Klima. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. Hamburg.
- Hübler, M.; Klepper, G.; Peterson, S. (2008): Costs of climate change: The effects of rising temperatures on health and productivity in Germany. *Ecological Economics* 68 (1-2), S. 381–393. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.04.010.
- Huehn, S.; Eichhorn, C.; Urmersbach, S.; Breidenbach, J.; Bechlars, S.; Bier, N.; Alter, T.; Bartelt, E.; Frank, C.; Oberheitmann, B.; Gunzer, F.; Brennholt, N.; Böer, S.; Appel, B.; Dieckmann, R.; Strauch, E. (2014): Pathogenic vibrios in environmental, seafood and clinical sources in Germany. *International journal of medical microbiology* 304 (7), S. 843–850. doi:10.1016/j.ijmm.2014.07.010.
- Imholt, C.; Reil, D.; Eccard, J. A.; Jacob, D.; Hempelmann, N.; Jacob, J. (2015): Quantifying the past and future impact of climate on outbreak patterns of bank voles (*Myodes glareolus*). *Pest management science* 71 (2), S. 166–172. doi:10.1002/ps.3838.
- Imholt, C.; Reil, D.; Plašil, P.; Rödiger, K.; Jacob, J. (2017): Long-term population patterns of rodents and associated damage in German forestry. *Pest management science* 73 (2), S. 332–340. doi:10.1002/ps.4325.
- Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) (Hrsg.) (2004): *Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe, Magdeburg*.

- Kahl, O.; Dautel, H.; Mackenstedt, U.; Oehme, R.; Pfeffer, M.; Schaub, G.; Rubel, F.; Brugger, K. (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf das Vorkommen, die Aktivität und Verbreitung von als Überträger von Krankheitserregern bedeutenden Schildzecken. Umweltbundesamt (UBA), Berlin.
- Kaminski, U.; Glod, T. (2010): Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels in Deutschland auf den Start der Pollensaison, die Saisonlänge und die Pollenkonzentration der wichtigsten allergenen Pollen anhand der Pollendaten der Referenzstationen des Polleninformationsdienstes PID. In: A. Matzarakis, H. Mayer, F.-M. Chmielewski (Hrsg) Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology. – Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 20. Freiburg. S. 242–247.
- Kandarr, J.; Mücke, H.-G.; Reckert, H. (2015): Anpassung an die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels. Analyse der Anpassungsstrategien, -konzepte bzw. -aktionspläne der Bundesländer. Umweltbundesamt (UBA).
- Karatzas, K.; Katsifarakis, N.; Riga, M.; Werchan, B.; Werchan, M.; Berger, U.; Pfaar, O.; Bergmann, K.-C. (2018): New European Academy of Allergy and Clinical Immunology definition on pollen season mirrors symptom load for grass and birch pollen-induced allergic rhinitis. *Allergy* 73 (9), S. 1851–1859. doi:10.1111/all.13487.
- Karatzas, K.; Voukantsis, D.; Jaeger, S.; Berger, U.; Smith, M.; Brandt, O.; Zuberbier, T.; Bergmann, K.-C. (2014): The patient's hay-fever diary: three years of results from Germany. *Aerobiologia* 30 (1), S. 1–11. doi:10.1007/s10453-013-9303-5.
- Katellaris, C. H.; Beggs, P. J. (2018): Climate change: allergens and allergic diseases. *Internal medicine journal* 48 (2), S. 129–134. doi:10.1111/imj.13699.
- Kempf, C. (2007): Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden. *DIW Wochenbericht* 74 (11), S. 165–169.
- Kendrovski, V.; Baccini, M.; Martinez, G. S.; Wolf, T.; Paunovic, E.; Menne, B. (2017): Quantifying Projected Heat Mortality Impacts under 21st-Century Warming Conditions for Selected European Countries. *International journal of environmental research and public health* 14 (7), S. 1–16. doi:10.3390/ijerph14070729.
- Knuschke, P. (2011): Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der beruflichen solaren UV-Exposition. *Dermatologie in Beruf und Umwelt* 59 (04), S. 78–83. doi:10.5414/DBP59078.
- Konnert, M. (2014): Blühen und Fruktifizieren unserer Waldbäume in den letzten 60 Jahren. *LWF Wissen* (74), S. 37–45.
- Kotremba, C. (2019): Abschlussdokumentation im Projekt KlimawandelAnpassungsCOACH RLP. Ortsgemeinde Haßloch. Stiftung für Ökologie und Demokratie e. V.
- Krug, A.; Mücke, H.-G. (2018): Auswertung Hitze-bezogener Indikatoren als Orientierung der gesundheitlichen Belastung. *UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst* (2), S. 67–79.
- Kundzewicz, Z. W.; Hattermann, F. F. (2018): Hochwasserrisiken und Klimawandel in Europa. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 169–174.
- Kunz, M.; Mohr, S.; Punge, H. J. (2018): Schwere Hagelstürme in Deutschland und Europa. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 236–242.
- Kutschker, T. (2019): Flächenlagen nach Starkregenereignissen – Die Feuerwehr an der Belastungsgrenze: Starkregenereignisse und deren Auswirkungen auf die Einsatzplanung von Feuerwehr und Katastrophenschutz. In: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg) Klimawandel und Bevölkerungsschutz. – Bevölkerungsschutz 2. Bonn. S. 6–11.
- Kuttler, W. (2018): Hitzewellen in großen Städten: Folgen für die Gesundheit und Gegenmaßnahmen. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 76–82.
- Kyselý, J.; Plavcová, E.; Davídková, H.; Kynčl, J. (2011): Comparison of hot and cold spell effects on cardiovascular mortality in individual population groups in the Czech Republic. *Clim. Res.* 49 (2), S. 113–129. doi:10.3354/cr01014.

- Lake, I.; Colon, F.; Jones, N. (2018): Quantifying the health effects of climate change upon pollen allergy: a combined cohort and modelling study. *The Lancet Planetary Health* 2, S16. doi:10.1016/S2542-5196(18)30101-3.
- Lake, I. R.; Jones, N. R.; Agnew, M.; Goodess, C. M.; Giorgi, F.; Hamaoui-Laguel, L.; Semenov, M. A.; Solomon, F.; Storkey, J.; Vautard, R.; Epstein, M. M. (2017): Climate Change and Future Pollen Allergy in Europe. *Environmental health perspectives* 125 (3), S. 385–391. doi:10.1289/EHP173.
- Langen, U.; Schmitz, R.; Steppuhn, H. (2013): Häufigkeit allergischer Erkrankungen in Deutschland: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsbl* 56 (5-6), S. 698–706. doi:10.1007/s00103-012-1652-7.
- Larcher, W. (2001): *Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt* 6., neubearb. Aufl. Ulmer, Stuttgart.
- Lawrence, Z. D.; Perlwitz, J.; Butler, A. H.; Manney, G. L.; Newman, P. A.; Lee, S. H.; Nash, E. R. (2020): The Remarkably Strong Arctic Stratospheric Polar Vortex of Winter 2020: Links to Record-Breaking Arctic Oscillation and Ozone Loss. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125 (22). doi:10.1029/2020JD033271.
- Leitlinienprogramm Onkologie (Hrsg.) (2021): S3-Leitlinie Prävention von Hautkrebs. Langversion 2.0 AWMF Registernummer: 032/052OL. (Deutsche Krebsgesellschaft, Deutsche Krebshilfe, AWMF).
- Lelieveld, J.; Klingmüller, K.; Pozzer, A.; Pöschl, U.; Fnais, M.; Daiber, A.; Münzel, T. (2019): Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European heart journal* 40 (20), S. 1590–1596. doi:10.1093/eurheartj/ehz135.
- Levetin, E. (2004): Methods for aeroallergen sampling. *Current allergy and asthma reports* 4 (5), S. 376–383. doi:10.1007/s11882-004-0088-z.
- Liebers, U.; Witt, C. (2018): Stadtluft im Klimawandel — „Dusty and Hot“. *Pneumo News* 10 (1), S. 30–35. doi:10.1007/s15033-018-0868-0.
- Loos, S.; Albrecht, M.; Zich, K. (2019): Zukunftsfähige Krankenhausversorgung: Simulation und Analyse einer Neustrukturierung der Krankenhausversorgung am Beispiel einer Versorgungsregion in Nordrhein-Westfalen, Gütersloh. doi:10.11586/2019042.
- Lozán, J. L.; Friedrich, A.; Groenemeijer, P.; Sävert, T. (2018): Naturgewalt Tornado - Eine kurze Übersicht. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) *Warnsignal Klima. Extremereignisse*. Hamburg. S. 243–249.
- Mackay, C. (2003): Designing safe and comfortable outdoor living spaces. *Passive Low Energy Architecture. Proceedings of 20th International Conference*,
- Mahrenholz, P.; Knieling, J.; Knierim, A.; Martinez, G.; Molitor, H.; Schlipf, S. (2017): Optionen zur Weiterentwicklung von Anpassungsstrategien. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 335–344.
- Maier, W. A.; Grunewald, J.; Habedank, B.; Hartelt, K.; Kampen, H.; Kimmig, P.; Naucke, T.; Oehme, R.; Vollmer, A.; Schöler, A.; Schmitt, C. (2003): Mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Ausbreitung von primär humanmedizinisch relevanten Krankheitserregern über tierische Vektoren sowie auf die wichtigen Humanparasiten in Deutschland. *Climate Change 05/2003 UBA-FB 000454*, Berlin.
- Manney, G. L.; Santee, M. L.; Rex, M.; Livesey, N. J.; Pitts, M. C.; Veefkind, P.; Nash, E. R.; Wohltmann, I.; Lehmann, R.; Froidevaux, L.; Poole, L. R.; Schoeberl, M. R.; Haffner, D. P.; Davies, J.; Dorokhov, V.; Gernandt, H.; Johnson, B.; Kivi, R.; Kyrö, E.; Larsen, N.; Levelt, P. F.; Makshtas, A.; McElroy, C. T.; Nakajima, H.; Parrondo, M. C.; Tarasick, D. W.; Gathen, P. von der; Walker, K. A.; Zinoviev, N. S. (2011): Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature* 478 (7370), S. 469–475. doi:10.1038/nature10556.
- Marburger Bund (Hrsg.) (2019): Beschlüsse. *Marburger Bund*. 135. Hauptversammlung (in Münster. 25./26. Mai 2019. Download unter https://www.marburger-bund.de/sites/default/files/files/2019-05/Beschl%C3%BCsse_135_HV_.pdf.

- Marks, G. B.; Bush, R. K. (2007): It's blowing in the wind: new insights into thunderstorm-related asthma. *The Journal of allergy and clinical immunology* 120 (3), S. 530–532. doi:10.1016/j.jaci.2007.07.012.
- Maronga, B.; Banzhaf, S.; Burmeister, C.; Esch, T.; Forkel, R.; Fröhlich, D.; Fuka, V.; Gehrke, K. F.; Geletič, J.; Giersch, S.; Gronemeier, T.; Groß, G.; Heldens, W.; Hellsten, A.; Hoffmann, F.; Inagaki, A.; Kadasch, E.; Kanani-Sühring, F.; Ketelsen, K.; Khan, B. A.; Knigge, C.; Knoop, H.; Krč, P.; Kurppa, M.; Maamari, H.; Matzarakis, A.; Mauder, M.; Pallasch, M.; Pavlik, D.; Pfafferott, J.; Resler, J.; Rissmann, S.; Russo, E.; Salim, M.; Schrempf, M.; Schwenkel, J.; Seckmeyer, G.; Schubert, S.; Sühring, M.; Tils, R. von; Vollmer, L.; Ward, S.; Witha, B.; Wurps, H.; Zeidler, J.; Raasch, S. (2020): Overview of the PALM model system 6.0. *Geosci. Model Dev.* 13 (3), S. 1335–1372. doi:10.5194/gmd-13-1335-2020.
- Matzarakis, A. (2018): Das Stadtklima. Herausforderung heute und für die Zukunft. *der architekt* 5. Bund Deutscher Architekten (BDA).
- Mayrhuber, E. A.-S.; Dückers, M. L. A.; Wallner, P.; Arnberger, A.; Allex, B.; Wiesböck, L.; Wanka, A.; Kolland, F.; Eder, R.; Hutter, H.-P.; Kutalek, R. (2018): Vulnerability to heatwaves and implications for public health interventions - A scoping review. *Environmental research* (166), S. 42–54. doi:10.1016/j.envres.2018.05.021.
- Militzer, K.; Kistemann, T. (2018): Gesundheitliche Belastungen durch Extremwetterereignisse. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) *Warnsignal Klima. Extremereignisse*. Hamburg. S. 298–306.
- Minister of Health Canada (Hrsg.) (2011): *Adapting to Extreme Heat Events: Guidelines for Assessing Health Vulnerability*, Ottawa, CA.
- Minkos, A.; Dauert, U.; Feigenspan, S.; Kessinger, S. (2019): *Luftqualität 2018. Vorläufige Auswertung*, Dessau-Roßlau.
- Mücke, H.-G.; Matzarakis, A. (2018): Klimawandel und Gesundheit. In: H. E. Wichmann, H. Fromme (Hrsg) *Handbuch der Umweltmedizin*. Ausgabe 12/2018. Landsberg. Kapitel VIII–1.10.
- Mücke, H.-G.; Matzarakis, A. (2019): Klimawandel und Gesundheit. Tipps für sommerliche Hitze und Hitzewellen. *Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau*.
- Mücke, H.-G.; Straff, W.; Faber, M.; Haftenberger, M.; Laußmann, D.; Scheidt-Nave, C.; Stark, K. (2013): *Klimawandel und Gesundheit. Allgemeiner Rahmen zu Handlungsempfehlungen für Behörden und weitere Akteure in Deutschland*. Robert-Koch-Institut (RKI); Umweltbundesamt (UBA).
- Müller, O.; Jahn, A.; Gabrysch, S. (2018): Planetary Health: Ein umfassendes Gesundheitskonzept. *Deutsches Ärzteblatt* 115 (40), S. 1751–1752.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Munich RE) (Hrsg.) (2018): *TOPICS Geo Naturkatastrophen 2017. Analysen, Bewertungen, Positionen*, München.
- Muthers, S.; Laschewski, G.; Matzarakis, A. (2017): The Summers 2003 and 2015 in South-West Germany: Heat Waves and Heat-Related Mortality in the Context of Climate Change. *Atmosphere* 8 (11), S. 1–13. doi:10.3390/atmos8110224.
- Muthers, S.; Matzarakis, A. (2018): Hitzewellen in Deutschland und Europa. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) *Warnsignal Klima. Extremereignisse*. Hamburg. S. 83–91.
- National Collaborating Centre for Environmental Health (NCCEH) (2010): *Vulnerable Populations*. National Collaborating Centre for Environmental Health (NCCEH). Download unter <http://www.ncceh.ca/content/vulnerable-populations>. Stand: 08.09.2020.
- Neale, R. E.; Barnes, P. W.; Robson, T. M.; Neale, P. J.; Williamson, C. E.; Zepp, R. G.; Wilson, S. R.; Madronich, S.; Andradý, A. L.; Heikkilä, A. M.; Bernhard, G. H.; Bais, A. F.; Aucamp, P. J.; Banasza, A. T.; Bornman, J. F.; Bruckman, L. S.; Byrne, S. N.; Foereid, B.; Häder, D.-P.; Hollestein, L. M.; Hou, W.-C.; Hylander, S.; Jansen, M. A. K.; Klekociuk, A. R.; Liley, J. B.; Longstreth, J.; Lucas, R. M.; Martinez-Abaigar, J.; McNeill, K.; Olsen, C. M.; Pandey, K. K.; Rhodes, L. E.; Robinson, S. A.; Rose, K. C.; Schikowski, T.; Solomon, K. R.; Sulzberger, B.; Ukpebor, J.

E.; Wang, Q.-W.; Wängberg, S.-A.; White, C. C.; Yazar, S.; Young, A. R.; Young, P. J.; Zhu, L.; Zhu, M. (2021): Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, Update 2020. *Photochemical & Photobiological Sciences* (20), S. 1–67.

Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA) (Hrsg.) (2018): *Vibrio vulnificus* und andere Vibrionen in Badegewässern. Download unter https://www.nlga.niedersachsen.de/infektionsschutz/krankheitserreger_krankheiten/vibrio_vulnificus/vibrio-vulnificus-und-andere-vibrionen-in-badegewaessern-19317.html. Stand: 21.02.2019.

Nikogosian, C.; Krings, S. (2019): Anpassung an den Klimawandel - Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. In: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg) *Klimawandel und Bevölkerungsschutz*. – Bevölkerungsschutz 2. Bonn. S. 2–5.

Nitschke, M.; Tucker, G. R.; Bi, P. (2007): Morbidity and mortality during heatwaves in metropolitan Adelaide. *Medical Journal of Australia* 187 (11-12), S. 662–665. doi:10.5694/j.1326-5377.2007.tb01466.x.

Pampel, S. L. (2018): Wie sich der Klimawandel auf Allergien auswirkt. *CME* 15 (5), S. 20. doi:10.1007/s11298-018-6616-2.

Pauling, A.; Gehrig, R.; Clot, B. (2014): Toward optimized temperature sum parameterizations for forecasting the start of the pollen season. *Aerobiologia* 30 (1), S. 45–57. doi:10.1007/s10453-013-9308-0.

Pavlik, D.; Heidenreich, M.; Wolke, R.; Stern, R. (2016): KLENOS - Einfluss einer Änderung der Energiepolitik und des Klimas auf die Luftqualität sowie Konsequenzen für die Einhaltung von Immissionsgrenzwerten und Prüfung weitergehender emissionsmindernder Maßnahmen. Endbericht. Texte 84/2016. Technische Universität Dresden (TU Dresden); Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS); Freie Universität Berlin (FU), Dessau-Roßlau.

Pervilhac, C.; Schoilew, K.; Znoj, H.; Müller, T. J. (2019): Wetter und Suizid: Assoziation zwischen meteorologischen Variablen und suizidalem Verhalten - eine qualitative systematische Übersichtsarbeit. *Der Nervenarzt* 90. doi:10.1007/s00115-019-00795-x.

Pfaar, O.; Karatzas, K.; Bastl, K.; Berger, U.; Buters, J. T. M.; Darsow, U.; Demoly, P.; Durham, S. R.; Galán, C.; Gehrig, R.; van Gerth Wijk, R.; Jacobsen, L.; Katsifarakis, N.; Klimek, L.; Saarto, A.; Sofiev, M.; Thibaudon, M.; Werchan, B.; Bergmann, K.-C. (2020): Pollen season is reflected on symptom load for grass and birch pollen-induced allergic rhinitis in different geographic areas-An EAACI Task Force Report. *Allergy* 75 (5), S. 1099–1106. doi:10.1111/all.14111.

Ragettli, M.; Rösli, M. (2017): *Hitzewelle-Massnahmen-Toolbox*. Ein Massnahmenkatalog für den Umgang mit Hitzewellen für Behörden im Bereich Gesundheit. Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut (Swiss TPH), Basel.

Ragettli, M. S.; Vicedo-Cabrera, A. M.; Schindler, C.; Rösli, M. (2017): Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. *Environmental research* 158, S. 703–709. doi:10.1016/j.envres.2017.07.021.

Ramamurthy, T.; Ghosh, A.; Pazhani, G. P.; Shinoda, S. (2014): Current Perspectives on Viable but Non-Culturable (VBNC) Pathogenic Bacteria. *Front. Public Health* 2. doi:10.3389/fpubh.2014.00103.

Reid, S. J.; Tuck, A. F.; Kiladis, G. (2000): On the changing abundance of ozone minima at northern midlatitudes. *J. Geophys. Res.* 105 (D10), S. 12169–12180. doi:10.1029/2000JD900081.

Reil, D.; Imholt, C.; Eccard, J. A.; Jacob, J. (2015): Beech Fructification and Bank Vole Population Dynamics - Combined Analyses of Promoters of Human Puumala Virus Infections in Germany. *PloS one* 10 (7), 1–14. Aufsatznummer e0134124. doi:10.1371/journal.pone.0134124.

Reil, D.; Jacob, J.; Imholt, C.; Ulrich, R. G. (2018): Regionalspezifisches Vorhersagesystem für das Vorkommen gesundheitsgefährdender Nagetiere als Anpassung an den Klimawandel. *Climate Change* 08/2018. Julius-Kühn-Institut (JKI); Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit (FLI), Dessau-Roßlau.

- Reil, D.; Rosenfeld, U. M.; Imholt, C.; Schmidt, S.; Ulrich, R. G.; Eccard, J. A.; Jacob, J. (2017): Puumala hantavirus infections in bank vole populations: host and virus dynamics in Central Europe. *BMC ecology* 17 (1), S. 1–13. Aufsatznummer 9. doi:10.1186/s12898-017-0118-z.
- Reusswig, F.; Becker, C.; Lass, W.; Haag, L.; Hirschfeld, J.; Knorr, A.; Lüdeke, M. K.; Neuhaus, A.; Pankoke, C.; Rupp, J.; Walther, C.; Walz, S.; Weyer, G.; Wiesemann, E. (2016): Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Berlin – AFOK.
- Rex, M.; Salawitch, R. J.; Deckelmann, H.; Gathen, P. von der; Harris, N. R. P.; Chipperfield, M. P.; Naujokat, B.; Reimer, E.; Allaart, M.; Andersen, S. B.; Bevilacqua, R.; Braathen, G. O.; Claude, H.; Davies, J.; de Backer, H.; Dier, H.; Dorokhov, V.; Fast, H.; Gerding, M.; Godin-Beekmann, S.; Hoppel, K.; Johnson, B.; Kyrö, E.; Litynska, Z.; Moore, D.; Nakane, H.; Parrondo, M. C.; Risley, A. D.; Skrivankova, P.; Stübi, R.; Viatte, P.; Yushkov, V.; Zerefos, C. (2006): Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change. *Geophys. Res. Lett.* 33 (23). Aufsatznummer L23808. doi:10.1029/2006GL026731.
- Rex, M.; Salawitch, R. J.; Gathen, P. von der; Harris, N. R. P.; Chipperfield, M. P.; Naujokat, B. (2004): Arctic ozone loss and climate change. *Geophys. Res. Lett.* 31 (4). Aufsatznummer L04116. doi:10.1029/2003GL018844.
- Rieder, H. E.; Polvani, L. M. (2013): Are recent Arctic ozone losses caused by increasing greenhouse gases? *Geophys. Res. Lett.* 40 (16), S. 4437–4441. doi:10.1002/grl.50835.
- Rieder, H. E.; Polvani, L. M.; Solomon, S. (2014): Distinguishing the impacts of ozone-depleting substances and well-mixed greenhouse gases on Arctic stratospheric ozone and temperature trends. *Geophys. Res. Lett.* 41 (7), S. 2652–2660. doi:10.1002/2014GL059367.
- Robert Koch-Institut (RKI) (Hrsg.) (2013): Legionellose. Download unter https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_Legionellose.html#doc2387614bodyText5. Stand: 21.06.2019.
- Robert Koch-Institut (RKI) (Hrsg.) (2015): Amöbenenzephalitis. Download unter https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_Amoebenzephalitis.html#doc6547058bodyText3. Stand: 21.06.2019.
- Robert Koch-Institut (RKI) (Hrsg.) (2019): Vibrionen. Antworten auf häufig gestellte Fragen zu Nicht-Cholera-Vibrionen. Download unter <https://www.rki.de/SharedDocs/FAQ/Vibrionen/FAQ-Liste.html>. Stand: 10.02.2020.
- Robine, J.-M.; Cheung, S. L. K.; Le Roy, S.; van Oyen, H.; Griffiths, C.; Michel, J.-P.; Herrmann, F. R. (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes rendus biologiques* 331 (2), S. 171–178. doi:10.1016/j.crv.2007.12.001.
- Rooney, C.; McMichael, A. J.; Kovats, R. S.; Coleman, M. P. (1998): Excess mortality in England and Wales, and in Greater London, during the 1995 heatwave. *Journal of epidemiology and community health* 52 (8), S. 482–486.
- Rossinot, H. (2018): Lancet Countdown 2018 Report. Briefing for EU Policymakers.
- Rubel, F.; Brugger, K.; Monazahian, M.; Habedank, B.; Dautel, H.; Leverenz, S.; Kahl, O. (2014): The first German map of georeferenced ixodid tick locations. *Parasites & vectors* 7, 1–5. Aufsatznummer 477. doi:10.1186/s13071-014-0477-7.
- Rubel, F.; Brugger, K.; Walter, M.; Vogelgesang, J. R.; Didyk, Y. M.; Fu, S.; Kahl, O. (2018): Geographical distribution, climate adaptation and vector competence of the Eurasian hard tick *Haemaphysalis concinna*. *Ticks and tick-borne diseases* 9 (5), S. 1080–1089. doi:10.1016/j.ttbdis.2018.04.002.
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (2017): Grüne Lebensräume im Dorf – Pflanzempfehlungen unter sich verändernden Nutzungs- und Umweltbedingungen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen, Dresden.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein dringendes Umweltproblem. Sondergutachten.

Scherer, D.; Fehrenbach, U.; Lakes, T.; Lauf, S.; Meier, F.; Schuster, C. (2013): Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. *Die Erde; Journal of the Geographical Society of Berlin* (144 (3-4)), S. 238–259. Aufsatznummer doi:10.12854/erde-144-17.

Schultz, M. G.; Klemp, D.; Wahner, A. (2017): Luftqualität. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg.) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 127–136.

Schulz, H.; Karrasch, S.; Bölke, G.; Cyrus, J.; Hornberg, C.; Pickford, R.; Schneider, A.; Witt, C.; Hoffmann, B. (2018): *Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit*. Positionspapier der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V., Berlin.

Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) (Hrsg.) (2016): *Opinion on Biological effects of ultraviolet radiation relevant to health with particular reference to sunbeds for cosmetic purposes*, Luxemburg.

Screen, J. A.; Bracegirdle, T. J.; Simmonds, I. (2018): Polar Climate Change as Manifest in Atmospheric Circulation. *Current climate change reports* 4 (4), S. 383–395. doi:10.1007/s40641-018-0111-4.

Shindell, D. T.; Rind, D.; Lonergan, P. (1998): Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations. *Nature* 392 (6676), S. 589–592. doi:10.1038/33385.

Shumake-Guillemot, J. (2020): *Protecting Health from Hot Weather during the Covid-19 Pandemic*. Technical Brief. Global Heat Health Information Network (GHHIN).

Simoleit, A.; Wachter, R.; Gauger, U.; Werchan, M.; Werchan, B.; Zuberbier, T.; Bergmann, K.-C. (2016): Pollen season of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and temperature trends at two German monitoring sites over a more than 30-year period. *Aerobiologia* 32 (3), S. 489–497. doi:10.1007/s10453-016-9421-y.

Singer, B. D.; Ziska, L. H.; Frenz, D. A.; Gebhard, D. E.; Straka, J. G. (2005): Research note: Increasing Amb a 1 content in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen as a function of rising atmospheric CO₂ concentration. *Functional plant biology : FPB* 32 (7), S. 667–670. doi:10.1071/FP05039.

Sliney, D. H. (1986): Physical factors in cataractogenesis: ambient ultraviolet radiation and temperature. *Investigative ophthalmology & visual science* 27 (5), S. 781–790.

Sorg, D.; Klatt, A.; Plambeck, N. O.; Köder, L.; Balzer, F.; Biewald, A.; Bilharz, M.; Ehlers, K.; Frische, T.; Fuchs, D.; Geupel, M.; Hofmeier, M.; Jarikova, J.; Lehmann, S.; Marx, M.; Stark, C.; Vogel, I.; Wechsung, G. (2021): *Perspektiven für eine umweltverträgliche Nutztierhaltung in Deutschland*. Texte 33/2021. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Sperk, C.; Mücke, H. G. (2009): *Klimawandel und Gesundheit: Informations- und Überwachungssysteme in Deutschland*. Ergebnisse der internetbasierten Studie zu Anpassungsmaßnahmen an gesundheitliche Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland. Umweltbundesamt (UBA).

Stadtverwaltung der Landeshauptstadt Potsdam (Hrsg.) (2015): *Klimaschutzteilkonzept Anpassung an den Klimawandel in der Landeshauptstadt Potsdam*.

Stark, K.; Niedrig, M.; Biederbick, W.; Merkert, H.; Hacker, J. (2009): Die Auswirkungen des Klimawandels: Welche neuen Infektionskrankheiten und gesundheitlichen Probleme sind zu erwarten? *Bundesgesundheitsbl* 52 (7), S. 699–714. doi:10.1007/s00103-009-0874-9.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.) (2020): *Bevölkerung nach Geschlecht - Stichtag 31.12. - regionale Tiefe: Gemeinden*. Ergebnis - 12411-01-01-5. Download unter <https://www.regionalstatistik.de>. Stand: 13.01.2020.

Stenke, A.; Grewe, V. (2003): Impact of ozone mini-holes on the heterogeneous destruction of stratospheric ozone. *Chemosphere* 50 (2), S. 177–190. doi:10.1016/s0045-6535(02)00599-4.

- Steuil, K.; Jung, H.-G.; Heudorf, U. (2019): Hitzeassoziierte Morbidität: Surveillance in Echtzeit mittels rettungsdienstlicher Daten aus dem Interdisziplinären Versorgungsnachweis (IVENA). *Bundesgesundheitsbl* 62 (5), S. 589–598. doi:10.1007/s00103-019-02938-6.
- Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) (Hrsg.) (2018): Pollenflugkalender. Download unter <http://www.pollenstiftung.de/pollenvorhersage/pollenflug-kalender/>. Stand: 19.11.2019.
- Stock, B. (2015): BBSR-Analysen KOMPAKT 2/2015. Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden 2/2015. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn.
- Stöver, B. (2015): Gesundheit: Effekte des Klimawandels. GWS Discussion Paper 2015/6. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), Osnabrück.
- Straff, W.; Mücke, H.-G. (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bonn.
- Strahlenschutzkommission (SSK) (Hrsg.) (2016): Schutz des Menschen vor den Gefahren solarer UV-Strahlung und UV-Strahlung in Solarien. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, Bonn.
- Sun, F.; Chen, J.; Zhong, L.; Zhang, X.; Wang, R.; Guo, Q.; Dong, Y. (2008): Characterization and virulence retention of viable but nonculturable *Vibrio harveyi*. *FEMS microbiology ecology* 64 (1), S. 37–44. doi:10.1111/j.1574-6941.2008.00442.x.
- Szewzyk, R.; Selinka, H.-C. (2019) 20.02.2019, Telefonisch.
- Tannich, E. (2015): Auswirkungen des Klimawandels auf die Verbreitung krankheitsübertragender Tiere: Importwege und Etablierung invasiver Mücken in Deutschland. *Umwelt & Gesundheit* 09/2015. Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin (BNITM).
- Thamm, R.; Poethko-Müller, C.; Hüther, A.; Thamm, M. (2018): Allergische Erkrankungen bei Kindern und Jugendlichen in Deutschland: Querschnittergebnisse aus KiGGs Welle 2 und Trends. *Journal of Health Monitoring* 3 (3), S. 3–18. doi:10.17886/RKI-GBE-2018-075.
- Thomas, S. M.; Obermayr, U.; Fischer, D.; Kreyling, J.; Beierkuhnlein, C. (2012): Low-temperature threshold for egg survival of a post-diapause and non-diapause European aedine strain, *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Parasites Vectors* 5 (1), S. 100. doi:10.1186/1756-3305-5-100.
- Thomas, S. M.; Tjaden, N. B.; Frank, C.; Jaeschke, A.; Zipfel, L.; Wagner-Wiening, C.; Faber, M.; Beierkuhnlein, C.; Stark, K. (2018): Areas with High Hazard Potential for Autochthonous Transmission of *Aedes albopictus*-Associated Arboviruses in Germany. *International journal of environmental research and public health* 15 (6), S. 1–12. doi:10.3390/ijerph15061270.
- Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN) (Hrsg.) (2019): Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen - IMPAKT II, Erfurt.
- Traidl-Hoffmann, C. (2018): Allergie - Eine Umwelterkrankung. *UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst* (2), S. 47–55.
- Ufer, T.; Averdieck, H.; Wrede, A. (2019): Klimawandel und Baumsortimente der Zukunft – Stadtgrün 2025“. Abschlussbericht EIP-Projekt. Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Abteilung Gartenbau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2015): Empfehlung zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen. *Bundesgesundheitsbl* 58 (8), S. 908–920. doi:10.1007/s00103-015-2192-8.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019a): Beurteilung der Luftqualität in Deutschland: Ozonsituation. Sommer 2019, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019b): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019c): Trend der Ozon-Jahresmittelwerte. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/7_abb_trend-ozon-jmw_2019-11-01.pdf. Stand: 13.12.2019.

Uphoff, H.; Hauri, A. M. (2005): Auswirkungen einer prognostizierten Klimaänderung auf Belange des Gesundheitsschutzes in Hessen. Hessisches Landesprüfungs- und Untersuchungsamt im Gesundheitswesen (HLPUG).

UV-Schutz-Bündnis (2017): Vorbeugung gesundheitlicher Schäden durch die Sonne – Verhältnisprävention in der Stadt und auf dem Land: Grundsatzpapier des UV-Schutz-Bündnisses 10. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter. doi:10.1007/s00103-017-2619-5.

Vicedo-Cabrera, A. M.; Ragetti, M. S.; Schindler, C.; Rösli, M.; am Vicedo-Cabrera; Ragetti, M. S.; Schindler, C.; Rösli, M. (2016): Excess mortality during the warm summer of 2015 in Switzerland. *Swiss Med Wkly*. doi:10.4414/smw.2016.14379.

Vitt, R.; Laschewski, G.; Bais, A.; Diémoz, H.; Fountoulakis, I.; Siani, A.-M.; Matzarakis, A. (2020): UV-Index Climatology for Europe Based on Satellite Data. *Atmosphere* 11 (7), S. 727. doi:10.3390/atmos11070727.

Volkmer, B.; Greinert, R. (2011): UV and children's skin. *Progress in biophysics and molecular biology* 107 (3), S. 386–388. doi:10.1016/j.pbiomolbio.2011.08.011.

Walter, M.; Brugger, K.; Rubel, F. (2016): The ecological niche of *Dermacentor marginatus* in Germany. *Parasitology research* 115 (6), S. 2165–2174. doi:10.1007/s00436-016-4958-9.

Watanabe, S.; Sudo, K.; Nagashima, T.; Takemura, T.; Kawase, H.; Nozawa, T. (2011): Future projections of surface UV-B in a changing climate. *J. Geophys. Res.* 116 (D16), S. 321. doi:10.1029/2011JD015749.

Watts, N.; Amann, M.; Ayeb-Karlsson, S.; Belesova, K.; Bouley, T.; Boykoff, M.; Byass, P.; Cai, W.; Campbell-Lendrum, D.; Chambers, J.; Cox, P. M.; Daly, M. E.; Dasandi, N.; Davies, M.; Depledge, M.; Depoux, A.; Dominguez-Salas, P.; Drummond, P.; Ekins, P.; Flahault, A.; Frumkin, H.; Georgeson, L.; Ghanei, M.; Grace, D.; Graham, H.; Groisman, R.; Haines, A.; Hamilton, I.; Hartinger, S.; Johnson, A.; Kelman, I.; Kiesewetter, G.; Kniveton, D.; Liang, L.; Lott, M.; Lowe, R.; Mace, G.; Odhiambo Sewe, M.; Maslin, M.; Mikhaylov, S.; Milner, J.; Latifi, A. M.; Moradi-Lakeh, M.; Morrissey, K.; Murray, K.; Neville, T.; Nilsson, M.; Oreszczyn, T.; Owfi, F.; Pencheon, D.; Pye, S.; Rab-baniha, M.; Robinson, E.; Rocklöv, J.; Schütte, S.; Shumake-Guillemot, J.; Steinbach, R.; Tabatabaei, M.; Wheeler, N.; Wilkinson, P.; Gong, P.; Montgomery, H.; Costello, A. (2018): The Lancet Countdown on health and climate change: From 25 years of inaction to a global transformation for public health. *The Lancet* 391 (10120), S. 581–630. doi:10.1016/S0140-6736(17)32464-9.

Weger, L. A. de; Molster, F.; Raat, K. de; Haan, J. den; Romein, J.; van Leeuwen, W.; Groot, H. de; Mostert, M.; Hiemstra, P. S. (2020): A new portable sampler to monitor pollen at street level in the environment of patients. *The Science of the total environment* 741, S. 140404. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140404.

Weidlich, S. (2019): Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Rechtliche Steuerung bei unseren Wissensgrundlagen. Kassel University Press, Kassel. doi:10.19211/KUP8783737607971.

Weis, K. E.; Hammond, R. M.; Hutchinson, R.; Blackmore, C. G. M. (2011): Vibrio illness in Florida, 1998–2007. *Epidemiology and infection* 139 (4), S. 591–598. doi:10.1017/S0950268810001354.

Weltgesundheitsorganisation (WHO) (2019): Gesundheitshinweise zur Prävention hitzebedingter Gesundheitsschäden. WHO-Regionalbüro für Europa.

Werchan, B.; Werchan, M.; Bergmann, K.-C. (2017): Studie zum Vergleich von allergischen Symptomdaten aus einer Pollen-App mit Pollenkonzentrationen aus 2014 in Berlin. *Umwelt & Gesundheit* 02/2017. Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst, Dessau-Roßlau.

Werchan, M. (2017): MALL AND HANDY - The personal particle sampler 2017, Helsinki.

Werding, M. (2018): Gesundheitswesen. Gabler Wirtschaftslexikon. Download unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/gesundheitswesen-34513/version-258015>. Stand: 09.12.2019.

Wesp, J.; Reifferscheid, G. (2019) 15.05.2019, Telefonisch.

Wiesböck, L.; Wanka, A.; Mayrhuber, E. A.-S.; Allex, B.; Kolland, F.; Hutter, H. P.; Wallner, P.; Arnberger, A.; Eder, R.; Kutalek, R. (2016): Heat Vulnerability, Poverty and Health Inequalities in Urban Migrant Communities: A Pilot Study from Vienna. Climate change and health. Improving resilience and reducing risks. In: W. Leal Filho, U. M. Azeiteiro, F. Alves (Hrsg) Climate Change and Health. Improving Resilience and Reducing Risks. – Climate Change Management. s.l. S. 389–401. doi:10.1007/978-3-319-24660-4_22.

World Health Organization (WHO) (Hrsg.) (2018): Climate change and health. Download unter <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>. Stand: 29.04.2019.

World Meteorological Organization (WMO) (Hrsg.) (2018): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018. Executive Summary. Global Ozone Research and Monitoring Project 58. United Nations Environment Programme (UNEP); Europäische Kommission, Genf, CH.

Zacharias, S.; 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. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Zhang, J.; Sun, H.; Chen, Q.; Gu, J.; Ding, Z.; Xu, Y. (2019): Effects of individual ozone exposure on lung function in the elderly: a cross-sectional study in China. Environmental science and pollution research international. doi:10.1007/s11356-019-04324-w.

Ziello, C.; Sparks, T. H.; Estrella, N.; Belmonte, J.; Bergmann, K.-C.; Bucher, E.; Brighetti, M. A.; Damialis, A.; Detandt, M.; Galán, C.; Gehrig, R.; Grewling, L.; Gutiérrez Bustillo, A. M.; Hallsdóttir, M.; Kockhans-Bieda, M.-C.; Linares, C. de; Myszkowska, D.; Páldy, A.; Sánchez, A.; Smith, M.; Thibaudon, M.; Travaglini, A.; Uruska, A.; Valencia-Barrera, R. M.; Vokou, D.; Wachter, R.; Weger, L. A. de; Menzel, A. (2012): Changes to airborne pollen counts across Europe. PloS one 7 (4), e34076. doi:10.1371/journal.pone.0034076.

Ziel, B.; Matzarakis, A. (2018): Bedeutung von Hitzeaktionspläne für den präventiven Gesundheitsschutz in Deutschland. Gesundheitswesen 80 (4), e34-e43. doi:10.1055/s-0043-107874.