

CLIMATE CHANGE

23/2021

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur

CLIMATE CHANGE 23/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 102 0

UBA-FB xxx

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infra-
struktur

von

Maike Voß, Walter Kahlenborn, Luise Porst, Lukas Dorsch
adelphi, Berlin

Enno Nilson
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Elisabeth Rudolph
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Anne-Farina Lohrengel
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

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

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

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

Durchführung der Studie:

adelphi research gemeinnützige GmbH
Alt-Moabit 91
10559 Berlin

Eurac Research
Viale Druso/Drususallee 1
I-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 0000-0000

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 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur

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 das Cluster Infrastruktur, welchem die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ 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 4: Risks and adaptation in the thematic cluster “Infrastructure”

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. To this end, both future climate risks and opportunities for adaptation were examined in a structured manner according to climate impacts and fields of action. This sub-report deals with the thematic cluster “Infrastructure” which is composed of the fields of action "Housing, construction", "Energy industry" and "Transport, transport infrastructure".

For each field of action, selected climate impacts are analyzed, whereby the current state of knowledge and the development up to the middle and the 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 possible challenges regarding adaptation are identified. These sections are complemented by an assessment of the adaptation capacity as well as 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.....	13
Glossar	15
Zusammenfassung.....	21
1 Einleitung.....	29
1.1 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021)	29
1.2 Die Grenzen der KWRA 2021	30
1.3 Methodisches Vorgehen	30
1.4 Beteiligte an der KWRA 2021	32
1.5 Struktur des Berichtes der KWRA 2021	32
2 Handlungsfeld Bauwesen	34
2.1 Ausgangslage.....	34
2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes.....	34
2.1.2 Neuere Entwicklungen.....	34
2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	35
2.2 Klimawirkungen im Detail	37
2.2.1 Schäden an Gebäuden	37
2.2.1.1 Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen	38
2.2.1.2 Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser	41
2.2.2 Vegetation in Siedlungen	52
2.2.3 Stadtklima/Wärmeinseln	64
2.2.4 Innenraumklima	77
2.2.5 Zeiten für Bautätigkeit	80
2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	82
2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	82
2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	84
2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder	84
2.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	86
2.5 Quellenverzeichnis.....	88
3 Handlungsfeld Energiewirtschaft	98
3.1 Ausgangslage.....	98
3.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes.....	98

3.1.2	Neuere Entwicklungen.....	99
3.1.3	Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	100
3.2	Klimawirkungen im Detail	101
3.2.1	Bedarf an Kühlenergie	101
3.2.2	Bedarf an Heizenergie.....	106
3.2.3	Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger	109
3.2.4	Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke.....	112
3.2.5	Ertragsminderung/-zunahme bei Photovoltaikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See.....	114
3.2.6	Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung	117
3.3	Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	120
3.3.1	Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	120
3.3.2	Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	122
3.3.3	Beiträge der Querschnittsfelder	123
3.4	Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse	124
3.5	Quellenverzeichnis	126
4	Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	134
4.1	Ausgangslage.....	134
4.1.1	Relevanz des Handlungsfeldes.....	134
4.1.2	Neuere Entwicklungen.....	135
4.1.3	Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	136
4.2	Klimawirkungen im Detail	138
4.2.1	Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser).....	138
4.2.2	Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Hochwasser)	149
4.2.3	Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen	153
4.2.4	Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)	157
4.2.5	Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Gravitative Massenbewegungen).....	161
4.2.6	Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen	167
4.2.7	Schäden an Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen.....	169
4.3	Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	172
4.3.1	Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	172
4.3.2	Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	173
4.3.3	Beiträge der Querschnittsfelder	173

4.4	Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	175
4.5	Quellenverzeichnis.....	177

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Änderungen simulierter Hochwasserabflüsse mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren (HQ_{100}) in 30-Jahreszeiträumen in der Mitte und am Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971 bis 2000	43
Abbildung 2:	Maximale Trockenperiode ($CDD_{[1]}$) im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober).....	56
Abbildung 3:	Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April-September)	57
Abbildung 4:	Anzahl heißer Tage im Sommer (Juni-August)	57
Abbildung 5:	Siedlungsflächen.....	58
Abbildung 6:	Maximale Wärmeinselintensität (UHI_{max})	68
Abbildung 7:	Kühlgradtage ($CDD_{[2]}$) in Kelvin mal Tag [$K \cdot Tag$], mittlere Jahres- und Änderungswerte, gemittelt für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts.....	104
Abbildung 8:	Heizgradtage (HDD) in Kelvin mal Tag [$K \cdot Tag$], mittlere Jahres- und Änderungswerte, gemittelt für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts.....	107
Abbildung 9:	Tage unter dem Schwellenwert $Q20_{1971-2000}$ für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts (jeweils 15. und 85. Perzentil des RCP8.5) und Änderungswerte für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts.....	141
Abbildung 10:	Tage über dem Schwellenwert $Q01$ für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts (jeweils 15. und 85. Perzentil des RCP8.5) und Änderungswerte für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts	151
Abbildung 11:	Zeitreihen des Wasserstandes bei Cuxhaven (Elbe-Kilometer 725, links) und Hamburg St. Pauli (Elbe-Kilometer 625, rechts).....	155
Abbildung 12:	Mittleres Tidehochwasser (MThw; markiert durch 1, 3, 5, 7, 9 und 11) und mittleres Tideniedrigwasser (MTnw, markiert durch 2, 4, 6, 8, 10 und 12) entlang des Elbefahrwassers von Bake A in der Elbmündung bis Geesthacht.....	155
Abbildung 13:	Tage über dem Schwellenwert HQ_{10} für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts (jeweils 15. und 85. Perzentil des RCP8.5) und Änderungswerte für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts	159
Abbildung 14:	Fließschema zur Berechnung der Modifikation (Spezifizierung) der Hauptgefährdungsklassen für allgemeine gravitative Massenbewegungen	163
Abbildung 15:	Pufferbereiche um die potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bereiche (Gefährdungsklassen ≥ 10) (a) sowie die gefährdeten Streckenabschnitte des Bundesschienennetzes (b).....	163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Bauwesen“	36
Tabelle 2:	„Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	40
Tabelle 3:	„Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	44
Tabelle 4:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ laut APA III	46
Tabelle 5:	Möglichkeiten weiterreichender Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“	48
Tabelle 6:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung "Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser"	49
Tabelle 7:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung "Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser"	50
Tabelle 8:	„Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“: Wirksamkeit der Anpassung	51
Tabelle 9:	„Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	51
Tabelle 10:	Übersicht der Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	54
Tabelle 11:	„Vegetation in Siedlungen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	58
Tabelle 12:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung mit Bezug zur Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“ laut APA III.....	60
Tabelle 13:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“	61
Tabelle 14:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“	63
Tabelle 15:	„Vegetation in Siedlungen“: Wirksamkeit der Anpassung.....	63
Tabelle 16:	„Vegetation in Siedlungen“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	64
Tabelle 17:	Zuordnung von Wärmeinsel-Potenzialen zu Landnutzungsklassen der „Siedlungsflächenprojektionen 2045“ des BBSR (Behmer 2019).....	67
Tabelle 18:	„Stadtklima/Wärmeinseln“: Klimarisiko ohne Anpassung	69
Tabelle 19:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“ laut APA III.....	71
Tabelle 20:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“	73
Tabelle 21:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“	75
Tabelle 22:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“	76
Tabelle 23:	„Stadtklima/Wärmeinseln“: Wirksamkeit der Anpassung	76
Tabelle 24:	„Stadtklima/Wärmeinseln“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	77
Tabelle 25:	„Innenraumklima“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	79

Tabelle 26:	„Zeiten für Bautätigkeit“: Klimarisiko ohne Anpassung	81
Tabelle 27:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“	86
Tabelle 28:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Bauwesen“	87
Tabelle 29:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“	87
Tabelle 30:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“	100
Tabelle 31:	„Bedarf an Kühlenergie“: Klimarisiko ohne Anpassung	105
Tabelle 32:	„Bedarf an Heizenergie“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	108
Tabelle 33:	„Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	111
Tabelle 34:	„Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	113
Tabelle 35:	„Ertragsminderung/-zunahme bei Photovoltaikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	116
Tabelle 36:	„Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	119
Tabelle 37:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“	124
Tabelle 38:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“	125
Tabelle 39:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“	125
Tabelle 40:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“	137
Tabelle 41:	„Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	141
Tabelle 42:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ laut APA III	143
Tabelle 43:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“	146
Tabelle 44:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“	147
Tabelle 45:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“	147
Tabelle 46:	„Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“: Wirksamkeit der Anpassung.....	148
Tabelle 47:	„Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	148
Tabelle 48:	„Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Hochwasser)“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	152
Tabelle 49:	„Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen“: Klimarisiko ohne Anpassung	156
Tabelle 50:	„Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	160
Tabelle 51:	Expertenwissensbasierte Klassifikation des Gefährdungspotenzials durch Verschnitt der Gesteins- und der Hangneigungsklasse.....	162
Tabelle 52:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	164

Tabelle 53:	Gesamtlängen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bundesfernstraßen- und -schienenabschnitte (Gefährdungsklasse ≥ 10) im Bezugszeitraum (1971 bis 2000) und unter Berücksichtigung potenzieller Klimaänderungen (RCP8.5) für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts.....	165
Tabelle 54:	„Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Gravitative Massenbewegungen)“: Klimarisiko ohne Anpassung	165
Tabelle 55:	„Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	168
Tabelle 56:	„Schäden an Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen“: Klimarisiko ohne Anpassung	171
Tabelle 57:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“	175
Tabelle 58:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“	176
Tabelle 59:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“	176

Abkürzungsverzeichnis

APA III	Aktionsplan Anpassung III
BauGB	Baugesetzbuch
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CDD_[1]	Consecutive Dry Days
CDD_[2]	Cooling Degree Days
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
E_w	Virtuelle Bevölkerung
GIQ20	Gleichwertiger Abfluss
GÜK	Geologische Übersichtskarte
HDD	Heating Degree Days
HQ	Hochwasserabfluss
HQ10	Hochwasserabfluss, der statistisch einmal in 10 Jahren auftritt
HSQ	Tatsächlicher Abfluss bei höchstem Schifffahrtswasserstand
HSW	Höchster Schifffahrtswasserstand
IMA-A	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Kelvin
KLIWA	Klimaveränderung und Wasserwirtschaft
KWRA 2021	Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland
LAWA-AK	Ständiger Ausschuss Klimawandel der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
MThw	Mittleres Tidehochwasser
MTnw	Mittleres Tideniedrigwasser
Q20	Abflusswert, der im Mittel an circa 20 Tagen pro Jahr unterschritten wird
RCP	Representative Concentration Pathway
RNQ	Regulierungsniedrigwasserabfluss
ROG	Raumordnungsgesetz
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
TF	Trennflächen
TRY	Testreferenzjahre
UHI Potenzial	Wärmeinsel-Potenzial
UHI_{max}	Maximale Wärmeinselintensität

VA 2015	Vulnerabilitätsanalyse 2015
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VE	Verformungsempfindlichkeit
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung

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 geminderter 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

Begriff	Erläuterung
	Gruppenmitglieder haben dann die Möglichkeit ihre Antworten zu 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; Zarth 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.
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.

Begriff	Erläuterung
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 sozioökonomischen 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.
Netzwerkpartner und -partnerinnen	Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen, die Mitglied im Behördennetzwerk „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.

Begriff	Erläuterung
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 Risiken oder höheren Chancen im Vergleich zur pessimistischen Szenarienkombination darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Abstimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der optimistische 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 Risiken oder niedrigeren Chancen im Vergleich zur optimistischen Szenarienkombination darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Abstimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der pessimistische Fall die Kombination aus dem 85. Perzentil des RCP8.5 und dem Dynamik-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 Geschlecht, Familienstand, Wohnort etc.); können anhand von Kategorien verglichen werden, das heißt nominalskalierte Daten.
Qualitative Methoden	Methoden, die der Erhebung von Einschätzungen und narrativen Informationen dienen; vor allem Interviews, Telefonkonferenzen, darüber hinausgehende Gespräche mit Fachleuten (zum Beispiel im Rahmen von Workshops) 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, Infrastruktur oder ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Gegenden und Umständen, die betroffen sein könnten (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014). Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel Einwohnerdichte oder Vorkommen kritischer Infrastruktur.

Begriff	Erläuterung
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 vertretbaren 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 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).

Begriff	Erläuterung
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 diesen 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 4 werden Klimarisiken und Anpassung in den Handlungsfeldern „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ sowie „Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“ betrachtet.

Handlungsfeld Bauwesen

Im Handlungsfeld „Bauwesen“ steht im Zusammenhang mit klimawandelbedingten Risiken der Schutz von Menschen und Sachgütern im Mittelpunkt. Das grundlegende Prinzip sowohl bei der Schaffung als auch bei der Veränderung bestehender baulicher Strukturen ist folglich die Schadensvorsorge. Neben den Folgen des Klimawandels spielt für das „Bauwesen“ die demographische Entwicklung eine zentrale Rolle. So führt seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts die (Re-)Urbanisierung zu einem anhaltend starken Bebauungsdruck in Städten. Entsprechend rückläufig war in den letzten Jahren die Versorgung der Bevölkerung mit Erholungsflächen in Großstädten (mit über 500.000 Einwohnern), obwohl der Erhalt und die Verbesserung städtischen Grüns durch klimawandelbedingt steigende Risiken wie Hitzewellen und Starkregen an Bedeutung gewinnen. Schon heute führen Naturgefahren wie Sturm, Hagel, Starkregen und Flusshochwasser zu erheblichen Gebäudeschäden und stellen neue Anforderungen an die Gebäudestabilität/-widerstandsfähigkeit.

Schäden an Gebäuden können sowohl direkt durch Starkregen, insbesondere sommerliche Extremniederschläge von kurzer Dauer, als auch durch Hochwasserereignisse auftreten. Räumlich differenzierte Projektionen künftiger Starkregenhäufigkeit und -intensität sind aufgrund der Limitationen von Klimamodellen derzeit nicht möglich, generell ist aber mit einer klimawandelbedingten Intensivierung von Starkregen zu rechnen. Für Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser sind zahlreiche Faktoren in je nach Ereignistyp unterschiedlicher Kombination maßgeblich, sodass Projektionen extremer Hochwasser hohen Unsicherheiten unterliegen. Ohne zusätzliche Anpassungsmaßnahmen könnten sie in Zukunft klimawandelbedingt zunehmen. Für die Mitte des Jahrhunderts fallen die projizierten Änderungen im Süden und Westen geringer aus als in der Mitte und im Osten Deutschlands, während sich für das Ende des Jahrhunderts weitere, deutlichere Änderungen dann vor allem im Osten Deutschlands zeigen.

Die Vegetation in Siedlungen wird als Folge des Klimawandels voraussichtlich zusätzlichen Belastungen ausgesetzt sein, insbesondere durch häufigere, intensivere oder länger anhaltende

Trockenheit und/oder Hitze, Stürme sowie Schaderregerbefall und Krankheiten. Trockenheit kann in den meisten Regionen Deutschlands bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts sowohl zu- als auch abnehmen, während für Hitze im Laufe des Jahrhunderts flächendeckend Zunahmen erwartet werden.

Die zunehmende Urbanisierung führt zu einer flächenmäßigen Ausdehnung städtischer Wärmeinseln, wodurch mit einer Verstärkung der Hitzebelastung für Menschen in städtischen Verdichtungsräumen zu rechnen ist. Ein Einfluss des Klimawandels auf die Intensität der Wärmeinseln kann derzeit noch nicht eindeutig projiziert werden, da diese auch von regional unterschiedlich ausgeprägten Faktoren wie der Windgeschwindigkeit und dem Bewölkungsgrad abhängt. Die bauliche Verdichtung und höheren Bevölkerungskonzentrationen werden aber voraussichtlich intensitätserhöhend wirken, insbesondere wenn Begrünungspotenziale in der Stadtentwicklung nicht genutzt werden.

Der Klimawandel wird durch die zunehmende Anzahl und Dauer von Hitzeperioden ohne bauliche Anpassungsmaßnahmen vermehrt zu hohen Innenraumtemperaturen führen. In Ballungsräumen werden diese zusätzlich durch den städtischen Wärmeinseleffekt verstärkt. Neben zunehmender Hitzebelastung könnten sich steigende Innenraumtemperaturen auch negativ auf die Luftqualität und die Innenraumhygiene auswirken, indem sie die Freisetzung von Gefahrstoffen und den Schimmelbefall begünstigen.

Projektionen von Temperatur und Niederschlag zeigen einen Rückgang der Anzahl der Tage mit erschwerter Bautätigkeit („Schlechtwettertage“) bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa die Hälfte. Starkwind, Starkregen, Hitze und Belastungen mit Ultraviolettstrahlung können die Unfallgefahr und die Gesundheitsbelastung auf Baustellen dagegen erhöhen und so die Leistungsfähigkeit von Beschäftigten insbesondere im Freien einschränken oder aus Gründen des Arbeitsschutzes zu Bauunterbrechungen führen.

Die räumliche Exposition im Handlungsfeld „Bauwesen“ hängt wesentlich von der betrachteten Klimawirkung ab. Für Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser ist die relative Lage von Gebäuden zu Flüssen und deren Einzugsgebieten maßgeblich. Faktoren, die die Sensitivität von Gebäuden gegenüber klimawandelverknüpften Veränderungen beeinflussen, sind die Größe und Kubatur des Baukörpers, das verbaute Material und teilweise auch Elemente der Gebäudetechnik. Dies sind gleichzeitig sensitivitätsbeeinflussende Faktoren bei der Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“. Außerdem hängt die Sensitivität hierbei von stadtstrukturellen Faktoren wie urbaner Flächenversiegelung, flächenmäßiger Ausdehnung, Vegetationsbedeckung und Grünvolumen, bestehenden Luftleitbahnen oder dem Maß der baulichen Nutzung ab. Die Sensitivität der Vegetation in Siedlungen beeinflussende Faktoren sind neben der Vegetationsart und der Artenzusammensetzung auch die Luftqualität, Schadstoffeinträge wie Streusalz sowie der Grad der Versiegelung und der Bodenverdichtung.

Im Bauwesen werden bereits Anstrengungen zur Anpassung an den Klimawandel unternommen, einschließlich der Anpassung technischer Regelwerke und Normen, der Schaffung von Strukturen zur Institutionalisierung von Anpassung und der Erweiterung des Handlungsspielraums für Kommunen durch mehrere klimaanpassungsrelevante Novellen im Baugesetzbuch. Anzahl und Spektrum der beschlossenen Maßnahmen (APA III) und weiterführenden Anpassungsmöglichkeiten sind dabei vergleichsweise groß beziehungsweise breit. Maßnahmen zur Anpassung an erhöhte Gebäudeschadensrisiken betreffen sowohl den Gebäudeumbau als auch die Neuerrichtung von Gebäuden und bedürfen der Schaffung gesetzlicher Vorgaben und deren Konkretisierung durch Standards und technische Regelwerke. Beschlossene Maßnahmen zur Anpassung der Vegetation in Siedlungen beziehen sich beispielsweise auf die Berücksichtigung

der Trockenheitstoleranz von neugepflanzten Arten und auf die Förderung der Flächenentsiegelung. Letztere können auch den Auswirkungen eines möglicherweise zunehmenden Wärmeinseleffekts entgegenwirken, ebenso wie Fassaden- und Dachbegrünung, die Integration blauer und grüner Strukturen in urbane Siedlungsgebiete, polyzentrische Konzepte urbaner Stadtentwicklung sowie die baulich-technische Regulierung des Innenraumklimas.

Die Möglichkeiten weiterreichender Anpassung im Handlungsfeld schließen hochwasserangepasstes Bauen und entsprechende Standortentscheidungen ein, welche bauplanungs- und bauordnungsrechtliche Impulse benötigen. Ferner kann weiterreichende Anpassung in Form der Weiterentwicklung von Aus- und Fortbildungsangeboten für Akteure im Bausektor oder der Erweiterung und Verbesserung der grünen Infrastruktur in Siedlungsgebieten umgesetzt werden, wofür die Einführung von Standards sowie die Bewertung (und Monetarisierung) von Ökosystemleistungen hilfreich sein könnten. Weiterreichende Anpassung an den Wärmeinseleffekt, vornehmlich vegetationsbasierte Ansätze, werden bereits in der Praxis erprobt, bedürfen aber der Schaffung rechtlich bindender Vorgaben sowie möglicherweise finanzieller Anreize zur Anwendung in größerem Maßstab. Entscheidend für die Umsetzung solcher Ansätze ist auch die Wasserverfügbarkeit, speziell zur Bewässerung städtischen Grüns. Hemmnisse der Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“ können beispielsweise vom begrenzten Einfluss der öffentlichen Hand auf Gebäude in Privatbesitz, vom Denkmalschutz oder von hohen Kosten für hochwasserangepasstes Bauen ausgehen. Überlegungen zu transformativer Anpassung tendieren beispielsweise zum konsequenteren Freihalten von hochwassergefährdeten Flächen und generell zur Begrenzung der (pro-Kopf-)Inanspruchnahme von bebauter Fläche.

Während alle drei Querschnittsfelder (Bevölkerungsschutz, Finanzwirtschaft, Raumordnung) zur Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Bauwesen“ beitragen, sind raumplanerische Instrumente für den Umgang mit hochwasser- oder starkregenbedingten Gebäudeschadensrisiken, für die Regulierung sowohl des Stadt- als auch des Gebäudeklimas und für die Stärkung der städtischen Vegetation unter den Bedingungen des Klimawandels von besonderer Bedeutung.

Da die Klimawirkungen „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“, „Vegetation in Siedlungen“, „Stadtklima/Wärmeinseln“ und „Innenraumklima“ bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall als hohe Klimarisiken eingestuft wurden und eine Anpassungsdauer von zehn bis 50 Jahren (Gebäudeschäden, Stadtklima) beziehungsweise mehr als 50 Jahre (Vegetation in Siedlungen, Innenraumklima) angenommen wird, liegen für diese Klimawirkungen sehr dringende Handlungserfordernisse vor. Während „Vegetation in Siedlungen“ durch beschlossene Maßnahmen (APA III) auf ein mittleres Risiko (und durch weiterreichende Anpassung sogar auf ein gering-mittleres Risiko) gesenkt werden kann, können die Klimarisiken „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ und „Stadtklima/Wärmeinseln“ zwar nicht durch die beschlossenen Maßnahmen (APA III), aber durch weiterreichende Anpassung auf ein mittleres Risiko reduziert werden.

Handlungsfeld Energiewirtschaft

Das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ ist von hoher Relevanz für Wirtschaft und Gesellschaft und durch viele Querverbindungen mit vielen anderen Handlungsfeldern verknüpft. Die Energiewirtschaft wird von politischen Maßnahmen, technischen Entwicklungen und sozioökonomischen Prozessen beeinflusst. Aber auch der Klimawandel spielt dabei in vielerlei Hinsicht eine große Rolle. Dieser wirkt sich auf nahezu alle Teile der Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft aus. Erneuerbare Energien werden beispielsweise durch sich in ihrer Häufigkeit oder Intensität ändernde Wetterereignisse beeinflusst, während Atom- und Kohleenergie auf die Verfügbarkeit von Kühlwasser angewiesen sind, welche bei Niedrigwasserperioden eingeschränkt sein kann. Auch Übertragungs- und Versorgungsnetze, die entsprechend ausgebaut werden

müssen, können klimatischen Einflüssen ausgesetzt sein. Ferner wirkt sich der Klimawandel auch wesentlich auf die Energienachfrage aus. Dies zeigt sich zum Beispiel durch eine erwartete Verminderung des Heizbedarfs und eine Erhöhung des Kühlbedarfs durch mildere Winter und heißere Sommer, wobei die Nachfrage aber auch von vielen anderen Faktoren beeinflusst wird. Wesentlich für den Wärmeverbrauch, einen der größten Endenergieverbraucher in Deutschland besonders in Privathaushalten, ist zum Beispiel die beobachtete Steigerung der Energieeffizienz. Insgesamt wird erwartet, dass die Energienachfrage zukünftig sowohl aufgrund des Bevölkerungs- als auch des Wirtschaftswachstums steigen wird.

Der Bedarf an Kühlenergie ist wesentlich für klimawandelbedingte Änderungen im Energiebedarf. Neben klimatischen Einflussfaktoren (steigende Durchschnittstemperaturen, Hitze und erhöhte Luftfeuchtigkeit) wird er von noch weiteren Faktoren wie dem jeweiligen Gebäudetyp oder verhaltensbedingten Aspekten bestimmt, sodass Projektionen des zukünftigen Kühlenergiebedarfs hohen Unsicherheiten unterliegen. Sowohl für die Mitte als auch für das Ende des Jahrhunderts kann aber grundsätzlich von einem steigenden Bedarf ausgegangen werden. Der Klimatisierungsbedarfs stellt aber trotzdem nur einen kleinen Anteil des Gesamtenergieverbrauchs dar, so dass zukünftig keine Stromdefizite als Folge dieses Anstiegs zu erwarten sind. Für den Bedarf an Heizenergie ist eine klare Reduktion zu erwarten, sowohl bis zur Mitte als auch bis zum Ende des Jahrhunderts; der Bedarf wird in den Höhenlagen weiterhin deutschlandweit am höchsten sein. Während Projektionen eine Reduktion von insgesamt bis zu 30 Prozent bis zu Ende des Jahrhunderts zeigen, können vereinzelt aber auch in Zukunft kalte Winter, besonders durch Verschiebungen des polaren Jetstreams, und damit Zeiträume mit dennoch höherem Heizbedarf auftreten.

Auf Seite der Energieversorgung kann es zu Klimawirkungen auf regionale Lieferketten für fossile Energieträger kommen. Zum Beispiel kann der Transport von Kohle und Mineralöl über Wasserstraßen von verstärkt auftretenden Niedrigwasserereignissen betroffen sein. Die zukünftige Zunahme an heißen Tagen und steigenden Temperaturen besonders im Sommer kann des Weiteren die Verfügbarkeit von Kühlwasser reduzieren, da die Kühlwasser-Entnahme und -Einleitung zum Schutz der Gewässerökologie eingeschränkt werden kann. Dies kann eine Drosselung oder zeitweise Einstellung der Stromproduktion von thermischen Kraftwerken bedingen. Die Relevanz beider Klimawirkungen wird sich mit der Energiewende reduzieren und von insgesamt nur geringerer Bedeutung für die zukünftige Energieversorgung sein.

Auch die Erzeugungskapazität erneuerbarer Energieträger ist von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Beispielsweise reduzieren hohe Temperaturen und Hitzeperioden den Wirkungsgrad von Photovoltaikanlagen und hohe Windgeschwindigkeiten können eine zeitweilige Abschaltung von Windenergieanlagen erfordern. In beiden Fällen lassen Projektionen nur geringe Änderungen erwarten, bezüglich der Windgeschwindigkeiten und damit des Windenergieertrags existieren allerdings sehr hohe Unsicherheiten in den Projektionen. Extremwetterereignisse wie Hitzeperioden, Starkniederschläge, Stürme und Unwetter können schließlich Unterbrechungen und Netzschwankungen in der Energieversorgung insgesamt bedingen. Die erwarteten Zunahmen der ersten beiden Ereignistypen können damit die Zuverlässigkeit der Versorgung beeinträchtigen, zusammen mit dem für die Energiewende notwendigen Netzausbau (bis zur Mitte des Jahrhunderts). Aufgrund der hohen Verknüpfungsdichte des deutschen Stromnetzes sind jedoch auch weiterhin nur seltene Unterbrechungen zu erwarten.

Sowohl die Expositions- als auch die Sensitivitätsfaktoren im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ sind tendenziell klimawirkungsspezifisch. Auf der Anbieterseite sind beispielsweise Standortfaktoren wie die räumliche Nähe zu Küsten- oder Binnengewässern relevant. Für den Transport von fossilen Energieträgern spielten auch die Abhängigkeit von der Schiffbarkeit der Binnen-

schifffahrtsstraßen und damit indirekt entsprechende vorgelagerte Expositions- und Sensitivitätsfaktoren eine Rolle. Auf der Nachfrageseite ist beispielsweise ganz Deutschland von Zunahmen im Kühlenergiebedarf betroffen, aber Süddeutschland ist dieser Klimawirkung gegenüber besonders stark exponiert. Der Wärmeinseleffekt legt darüber hinaus auch Unterschiede in der Exposition zwischen urbanen und ländlichen Räumen nahe.

Bezüglich der Möglichkeiten zur Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ ergibt sich ein recht heterogenes Bild, wobei beschlossene Maßnahmen wie auch weiterreichende Anpassung vor allem die Nutzung von technischen Maßnahmen und natürlichen Ressourcen umfassen. Auf Seite der Energieversorgung spielt die autonome Anpassung der jeweiligen Akteure im Energiesektor im Vergleich zur Anpassung durch staatliches und regulierendes Handeln eine relativ große Rolle. Die Anpassungsfähigkeit der Energieinfrastruktur kann durch Investitionen in dezentrale Energieversorgungsstrukturen und die Etablierung von Smart Grids erhöht werden. Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie mögliche mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz und finanzielle Kosten können dagegen Anpassungshindernisse darstellen. Auch die Integration des Themas Klimaanpassung in Normungsverfahren erscheint sinnvoll. Transformative, systemüberschreitende Anpassungsmaßnahmen wie Standortverlagerungen sind eher nach Ausschöpfung anderer Mittel denkbar.

Zudem ist hervorzuheben, dass die im Rahmen der Energiewende beschlossenen Maßnahmen und Ziele sich nicht negativ auf zukünftige Anpassungspotenziale auswirken, und dass Maßnahmen der Anpassung im Handlungsfeld wiederum nicht zu einem erhöhten Energieverbrauch und gegebenenfalls steigenden Emissionen führen. Auf der Nachfrageseite beispielsweise sind dementsprechend alternative Kühltechnologien konventionellen Klimaanlage vorzuziehen. Hier ergibt sich auch ein hohes Potenzial für Maßnahmen, welche auch ohne die Folgen des Klimawandels ökonomisch sinnvoll scheinen (sogenannte „no-regret“-Maßnahmen), beispielsweise energieeffizientes Bauen zur Regulierung des Endenergieverbrauchs. Es bestehen zahlreiche weitere Zusammenhänge mit Anpassungsmöglichkeiten in anderen Handlungsfeldern, wie etwa der Wasserwirtschaft, dem Bauwesen und der menschlichen Gesundheit. Die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ wird durch Beiträge aus allen drei Querschnittsfeldern gestärkt. So trägt der Bevölkerungsschutz mit den Arbeiten zum Schutz und Erhalt kritischer Infrastrukturen und damit auch der Einrichtungen der Energieversorgung zur Anpassung bei. Die Finanzwirtschaft kann durch gezieltes Investment den Ausbau von erneuerbaren Energien unterstützen und die Regionalplanung leistet einen Beitrag in der Flächenplanung für den Ausbau erneuerbarer Energien.

Für das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ 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 oder dringenden Handlungserfordernisse vor.

Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur

Ein leistungsfähiger Verkehrssektor ist von hoher Bedeutung für die Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland und eng mit anderen Handlungsfeldern verknüpft. Unterbrechungen und Beeinträchtigungen der Verkehrssysteme können sich nicht nur auf die Verkehrssicherheit und -leistungsfähigkeit auswirken, sondern auch Unternehmensprozesse und die Produktivität beeinflussen. Auch die persönliche Alltagsorganisation kann beeinträchtigt werden bis hin zu Versorgungsengpässen oder Beeinträchtigungen der öffentlichen Sicherheit sofern kritische Infrastrukturen betroffen sind. Gleichzeitig ist der Verkehrssektor anfällig für Schäden infolge von Extremwetterereignissen.

Das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ist dementsprechend potenziell stark durch den Klimawandel betroffen. Ein künftiger, durch den Klimawandel bedingter Anstieg von Überflutungen, Stürmen, Hangrutschungen und extremen Hitzephase kann beispielsweise negative Folgen im Straßen- und Schienenverkehr haben, und sowohl Niedrigwasser- als auch Hochwasserereignisse können die Betriebsabläufe in der Binnenschifffahrt und bei den davon abhängigen Unternehmen beeinträchtigen.

Der Verkehrssektor unterliegt – abgesehen vom Klimawandel – einem fortwährenden Wandel der ökonomischen, umweltbezogenen und technischen Rahmenbedingungen. Verkehrsprognosen zeigen einen Anstieg des Verkehrsaufkommens an. Das Ziel der Umsetzung umweltfreundlicher und flexibler Verkehrskonzepte wird verfolgt (zum Beispiel Verlagerung im Gütertransport von der Straße auf die Schiene, auch die kombinierte und flexible Nutzung verschiedener Verkehrsarten sowohl im Güter- wie im Personenverkehr). Gleichzeitig sind technologische Entwicklungen zu berücksichtigen, insbesondere die fortschreitende Elektrifizierung, die Digitalisierung und die Automatisierung im Straßen-, Schienen- und Wasserstraßenverkehr.

Die Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen kann sowohl von Niedrig- als auch von Hochwasserereignissen beeinträchtigt sein. Beides kann klimawandelbedingt in der Zukunft verstärkt auftreten. Die durch Niedrigwasserereignisse bedingte saisonale Verringerung der Transportkapazitäten kann unter einem starken Klimawandel nennenswerte wirtschaftliche Auswirkungen haben. Projektionen zeigen im optimistischen Fall nur sehr moderate Veränderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Im pessimistischen Fall könnte bis zur Mitte des Jahrhunderts ein niedriger Schwellenwert, der heute an 20 Tagen unterschritten wird, an Rhein, Mosel und Teilabschnitten des Neckars an bis zu 35 Tagen unterschritten werden. Bis zum Ende des Jahrhunderts werden in diesem Fall an den meisten Binnenschifffahrtsstraßen intensivere und häufigere Niedrigwassersituationen projiziert. An den verkehrswirtschaftlich besonders wichtigen Bundeswasserstraßen Rhein und Donau könnten sich abschnittsweise Werte von über 40 Unterschreitungstagen ergeben, sofern keine Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden.

Die durch Hochwasserereignissen bedingten Schifffahrtseinschränkungen sind im Vergleich zu den Niedrigwasserereignissen von kürzerer Dauer und geringerer wirtschaftlicher Bedeutung. Im optimistischen Fall werden in beiden betrachteten Zukunftszeiträumen (Mitte und Ende des Jahrhunderts gegenüber der Bezugsperiode 1971 bis 2000) nur unwesentliche Änderungen hinsichtlich der Anzahl von Überschreitungen schifffahrtrelevanter Schwellenwerte erwartet. Im pessimistischen Fall steigt die Anzahl der Überschreitungstage zur Mitte des Jahrhunderts für fast alle Wasserstraßen an. Zum Ende des Jahrhunderts ergeben sich an den meisten Wasserstraßen jedoch keine weiteren Änderungen.

Auch die Schiffbarkeit der Seeschifffahrtstraßen ist durch die Folgen des Klimawandels, insbesondere die des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs betroffen; Seeschifffahrtsstraßen, aber auch Häfen und maritime Infrastrukturen werden in Zukunft höheren Sturmflutseitelwasserständen ausgesetzt sein. Eine durch den Meeresspiegelanstieg bewirkte Erhöhung der Flutstromdominanz kann zu einem erhöhten stromaufgerichteten Sedimenttransport und so zu einem erhöhten Aufwand für Unterhaltungsbaggerungen in den Ästuaren führen. Insgesamt wird der Aufwand für die Erhaltung der Funktionalität der Wasserstraßen- und Hafeninfrastruktur bis 2050 als eher geringe Herausforderung eingeschätzt, die jedoch bis zum Ende des Jahrhunderts weiter ansteigen wird.

Straßen und Schienenwege können von klimawandelbedingten Schäden oder Hindernissen infolge von extremen Flusshochwassern, Sturzfluten, Stürmen, gravitativer Massenbewegungen oder extremer Hitze betroffen sein. Bisher können die verkehrlichen Auswirkungen dieser Ereignisse nur mit hohen Unsicherheiten modelliert werden.

Bezüglich der Wirkung von Flusshochwassern ergeben sich im optimistischen Fall für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts keine wesentlichen Änderungen gegenüber heute, im pessimistischen Fall aber häufigere Einschränkungen. Bei gravitativen Massenbewegungen können klimatische Einflüsse die wesentlicheren ingenieur-geologischen Einflussfaktoren modifizieren und gegebenenfalls ereignisauslösend wirken; die Länge gefährdeter Streckenabschnitte des Bundesfernstraßen und Bundesschienennetzes könnte sich unter Berücksichtigung der klimatischen Einflüsse bis zum Ende des Jahrhunderts jeweils verdoppeln.

Der Klimawandel kann sich auch auf das Risiko von Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen auswirken. Der Temperaturanstieg und die Zunahme an heißen Tagen verstärkt die Auswirkungen von durch Hitze bedingten Schäden, während die projizierte Abnahme der Zahl an Frosttagen die durch Schnee- und Eislast bedingten Schäden reduzieren würde. Auswirkungen des Klimawandels auf Schäden durch Windbruch (zum Beispiel an Oberleitungen) ergeben sich nach derzeitiger Datenlage nicht, da die Projektionen von Windfeldern keine eindeutigen Änderungstendenzen aufweisen.

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ wirken sich verschiedene Faktoren auf die Betroffenheit der Verkehrsmittel und -träger von den Folgen des Klimawandels aus. Bedeutende Faktoren sind dabei der Zustand der jeweiligen Verkehrsinfrastruktur sowie das Verkehrs- und Transportaufkommen. Die Sensitivität der Schienen- und Straßenabschnitte gegenüber Überflutungen ist abhängig von der Höhenlage der Gleiskörper beziehungsweise der Fahrbahnen in Flussnähe (Flusshochwasser) und von der Verfügbarkeit und dem Volumen von Rückhalte- und Entwässerungsanlagen (Sturzfluten). Die Sensitivität gegenüber Windbrüchen hängt ab von der streckennahen Vegetation (Baumbestand) und deren Management und Infrastrukturparametern (Oberleitungen). Die Sensitivität der Binnenschifffahrt gegenüber Hoch- und Niedrigwasserbedingten Einschränkungen wird unter anderem durch die Einzugsgebietseigenschaften (inklusive der installierten Bewirtschaftungsmaßnahmen) und die Fahrwassereigenschaften (Tiefe und Breite; Wasserstraßenmanagement; Brückenhöhen) beeinflusst.

Für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ enthält der APA-III vergleichsweise viele Maßnahmen. So schaffen zum Beispiel Forschungsvorhaben wie das Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertenetzwerk eine gute Wissensbasis hinsichtlich der vielfältigen Klimawirkungen, des Anpassungsbedarfes und ausgewählter Anpassungsmaßnahmen im Verkehrssektor.

Mit Blick auf die Anpassung der Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtstraßen gegenüber Niedrigwasserereignissen enthält der „Aktionsplan Niedrigwasser Rhein“ ein Bündel unterschiedlicher Maßnahmen. Hierzu gehört unter anderem die Fortentwicklung von Vorhersagesystemen.

Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten empfehlen sich wie in anderen Handlungsfeldern auch hinsichtlich möglicher weiterreichender Anpassungsmaßnahmen sogenannte „low-regret“-Maßnahmen. Hierzu gehören Maßnahmen der Flexibilisierung sowohl im Bereich des Flussbaus (flexible Elemente) als auch im Bereich der Logistik (zum Beispiel Vereinfachung des intermodalen Verkehrs). Querbezüge der Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ergeben sich mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld trägt insbesondere das Querschnittsfeld Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung trägt bei.

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtstraßen (Niedrigwasser)“ analysiert und eingeschätzt. Die befragten Experten und Expertinnen kommen zu der Einschätzung, dass die vielen bereits im APA III enthaltenen Maßnahmen ausreichen könnten, um das Klimarisiko

der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ auch im pessimistischen Fall von "hoch" auf „mittel“ zu senken. Durch weiterreichende Anpassung könnte eine Reduktion auf ein Klimarisiko von „gering“ möglich sein.

Das Handlungserfordernis wird für die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ als sehr dringend eingestuft, 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 „Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)“, „Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (gravitative Massenbewegungen)“ und „Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen“.

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 vorliegende Teilbericht 4 behandelt das Cluster Infrastruktur, welchem die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zugeordnet sind.

In Teilbericht 5 werden sowohl das Cluster Wirtschaft, mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“ sowie „Tourismuswirtschaft“, 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 Bauwesen

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

2.1 Ausgangslage

2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel sind für das Handlungsfeld „Bauwesen“ die steigenden Anforderungen an die Schadensvorsorge bei der Schaffung oder Veränderung baulicher Strukturen relevant, um dem Schutz von Menschen und Sachgütern Rechnung zu tragen (Bundesregierung 2008). Im Fokus der nachfolgenden Betrachtungen liegen (städte-) bauliche und planerische Herausforderungen. Auswirkungen des Klimawandels auf das Bauwesen als Wirtschaftszweig werden nur am Rande betrachtet (siehe 2.2.5).

Das Handlungsfeld „Bauwesen“ spielt eine wichtige Rolle in den im Fortschrittsbericht zur deutschen Anpassungsstrategie (DAS) beschriebenen handlungsfeldübergreifenden Schwerpunkten, welche aus der letzten Vulnerabilitätsanalyse hervorgingen (Bundesregierung 2015). Als erster Schwerpunkt wurden dabei „Schäden durch ansteigende Hitzebelastung in Verdichtungsräumen“ definiert (Bundesregierung 2015; S. 56). In diesem Kontext werden im Handlungsfeld „Bauwesen“ die stadtklimatischen Funktionen von Siedlungsvegetation (siehe 2.2.2) sowie das Stadtklima insgesamt untersucht (siehe 2.2.3). Die Ergebnisse dieser Betrachtung fließen wiederum in die Einschätzung gesundheitlicher Risiken durch „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ ein.

Weitere handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte sind „Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Starkregen und Sturzfluten in urbanen Räumen“ sowie „Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Flussüberschwemmungen“ (Bundesregierung 2015; S. 57). Diese Schwerpunkte finden sich im Folgenden in der Untersuchung von Gebäudeschäden aufgrund von Starkregen und Flusshochwasser wieder (siehe 2.2.1). Infrastrukturschäden werden in den Handlungsfeldern „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, Küsten- und Meeresschutz“ und „Tourismuswirtschaft“ näher betrachtet. Weitere Querverbindungen bestehen zu den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Industrie und Gewerbe“.

2.1.2 Neuere Entwicklungen

Das Handlungsfeld „Bauwesen“ ist eng mit demographischen Entwicklungen verknüpft. Während in den 1970er und 1980er Jahren in vielen Großstädten ein Trend in Richtung Suburbanisierung vorherrschte und sich während der 1990er Jahre vornehmlich Bevölkerungsbewegungen in Richtung der alten Bundesländer vollzogen, ist seit der Jahrtausendwende die (Re-)Urbanisierung ein maßgeblicher Trend bei der Bevölkerungsverteilung (BBSR 2015). Dies führte zu einem anhaltend starken Baudruck in Städten (Thomsen et al. 2019). Baugenehmigungen und Baufertigstellungen nahmen daher seit 2010 in deutschen Städten wieder zu, nachdem diese zuvor seit Mitte der 1990er Jahre gesunken waren. Seit 2016 sinkt die Anzahl der Baugenehmigung allerdings wieder leicht (Destatis 2018).

Naturgefahren wie Sturm, Hagel, Starkregen und Flusshochwasser führen schon heute zu erheblichen Gebäudeschäden (GDV 2019c). Aufgrund des Klimawandels könnten Extremwetterereignisse und damit einhergehende Schäden zunehmen (Böttcher et al. 2017). Bereits in den vergangenen zehn Jahren zeigte sich ein weltweiter Trend zu höheren Schäden durch konvektive Sturmereignisse, von dem auch Deutschland nicht verschont blieb (Munich RE 2019). Einige Trends deuten allerdings auf eine verbesserte Anpassung von Gebäuden und Infrastrukturen gegenüber

Extremwetterereignissen hin. So führten beispielsweise die katastrophalen Flusshochwasser im Jahr 2003 zu einer Verbesserung des Hochwasserrisikomanagements, wodurch Schäden im hydrologisch noch extremeren Hochwasserjahr 2013 geringer ausfielen (Thieken et al. 2016). Zudem steigt die Versicherungsquote von Wohngebäuden gegen Naturgefahren wie Starkregen und Flusshochwasser (Elementarschadenversicherung) seit 2002 stetig an und hat sich in den letzten 15 Jahren verdoppelt (GDV 2019c).

Im Zuge städtischer Nachverdichtungsprozesse ist die Versorgung der Bevölkerung mit Erholungsflächen in Großstädten über 500.000 Einwohner in den letzten Jahren rückläufig (UBA 2019b). Gleichzeitig gewinnen der Erhalt und die Verbesserung von Stadtgrün durch steigende klimawandelbedingte Risiken wie Hitzewellen und Starkregen an Bedeutung (Dosch et al. 2017). Die Auswirkungen des Klimawandels auf Siedlungsvegetation waren in den letzten 100 Jahren ambivalent, da längere Vegetationsperioden und steigende Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen auch positive Effekte auf das Pflanzenwachstum haben (Moser et al. 2017). Mit fortschreitendem Klimawandel können allerdings neue Schädlinge und Krankheiten, Trockenheit, Hitze, erhöhte Ozonwerte, Überschwemmungen, Stürme und Spätfrostschäden zu gravierenden Schäden an der Siedlungsvegetation führen (Mathey et al. 2011; Kühn und Gillner 2017).

Bezüglich des urbanen Wärmeinseleffekts zeichnete sich in der Vergangenheit bis 2015 keine eindeutige Veränderung ab. So zeigen Messungen in Berlin seit 1975 keinen Trend der sommerlichen Wärmeinselintensität (UBA 2015; UBA 2019b). Die fortschreitende Urbanisierung kann in Zukunft insbesondere durch die zunehmende Verdichtung und Flächenversiegelung in Städten zu einer Verstärkung des Wärmeinseleffekts beitragen (Früh et al. 2011). Zudem kann die zu erwartende Zunahme von sommerlichen Hitzeextremen die Ausprägung städtischer Wärmeinseln in ihrer Häufigkeit und Intensität in Zukunft verstärken (Hackenbruch 2018). Für Berlin konnte gezeigt werden, dass während heißer Episoden der Wärmeinseleffekt nachts stärker wird, wenn die Lufttemperaturen tagsüber erhöht sind. Der Wärmeinseleffekt wird jedoch nachts schwächer, wenn es im Umland in der Nacht besonders warm ist (Fenner et al. 2019). Derzeit herrscht jedoch noch keine Klarheit darüber, ob der Klimawandel in Zukunft eine Veränderung des Wärmeinseleffekts hervorrufen wird, da dieser von den jeweiligen Wetterbedingungen abhängt (Fenner et al. 2019).

2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Flusshochwasser, Sturzfluten, Hitze, Starkwind und Sturmfluten sind besonders relevante klimatische Einflüsse und vorgelagerte Klimawirkungen im Handlungsfeld „Bauwesen“ (UBA 2016). Sie führen zu Schäden an Gebäuden und dazugehörigen Infrastrukturen, beeinflussen die Umweltqualität in Städten und stellen neue Anforderungen an die Gebäudefunktionalität.

Zur näheren Betrachtung von „Schäden an Gebäuden“ wurden die Einflüsse Starkregen und Flusshochwasser ausgewählt. Schäden an Verkehrsinfrastrukturen sind Gegenstand des Handlungsfelds „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. Auf „Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“ wird im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ eingegangen, auf Schäden an touristischen Infrastrukturen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“.

Von besonderer Bedeutung im Handlungsfeld „Bauwesen“ sind vorgelagerte Klimawirkungen für die Untersuchung von „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“. Daher beschäftigt sich die Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“ mit der möglichen Beeinträchtigung stadtklimatischer Funktionen von Siedlungsvegetation. Das Stadtklima und der urbane Wärmeinseleffekt werden im Kapitel „Stadtklima/Wärmeinseln“ untersucht. Weitere Aspekte

der Umweltqualität in Städten, zum Beispiel die hygienische Situation, wurden nicht zur weiteren Betrachtung im Handlungsfeld „Bauwesen“ ausgewählt. Auf Atembeschwerden durch bodennahes Ozon und Smog wird im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ eingegangen.

(Stadt-)klimatische Einflüsse wirken sich auch auf das „Innenraumklima“ aus, was mit veränderten Anforderungen an die Gebäudefunktionalität einhergeht. Auch die Bedarfe an Kühl- und an Heizenergie stehen damit in engem Zusammenhang (siehe 3.2.1 und 3.2.2).

Der Klimawandel beeinflusst allerdings nicht nur die baulichen Anforderungen, sondern hat auch Auswirkungen auf die Bautätigkeit. So können beispielsweise Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen der Bau- und Immobilienwirtschaft, wie Baugerüste oder Zufahrtswege, zu Beeinträchtigungen führen. Des Weiteren können sich klimawandelbedingte „Leistungseinbußen von Beschäftigten“ auf die Bauwirtschaft auswirken (siehe Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“). Veränderungen von Temperatur, Sonnenscheindauer und Extremwetterereignissen haben zudem einen Einfluss darauf, wann gebaut werden kann und wie viel Zeit Bauvorhaben in Anspruch nehmen (siehe 2.2.5).

Tabelle 1: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Bauwesen“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Schäden an Gebäuden	Intensive Bearbeitung (unter Berücksichtigung von Indikatoren und quantitativen Daten) Spezifizierung: Schäden an Gebäuden 1) aufgrund von Starkregen 2) aufgrund von Flusshochwasser
Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen der Bau- und Immobilienwirtschaft	Integriert in „Schäden an Gebäuden“
Vegetation in Siedlungen	Intensive Bearbeitung (unter Berücksichtigung von Indikatoren und quantitativen Daten) Spezifizierung: Stadtklimatische Funktionen von Siedlungsvegetation
Stadtklima/Wärmeinseln	Intensive Bearbeitung (unter Berücksichtigung von Indikatoren und quantitativen Daten); vorgelagerte Klimawirkung
Innenraumklima	Extensive Bearbeitung
Zeiten für Bautätigkeit	Extensive Bearbeitung
Bodennahes Ozon	Nicht ausgewählt
Luftqualität (Smog)	Nicht ausgewählt
Hygienische Situation in Siedlungen	Nicht ausgewählt
Bedarf an Kühlenergie	Im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“
Bedarf an Heizenergie	Im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“
Leistungseinbußen von Beschäftigten	Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

2.2 Klimawirkungen im Detail

2.2.1 Schäden an Gebäuden

Extremwetterereignisse wie Hochwasser, Überflutung, Starkregen, Sturzfluten, Sturm, Hagel sowie Schnee- und Eisdruck verursachen hohe Gebäudeschäden. Im Folgenden wird zunächst allgemein auf Schäden an Gebäuden aufgrund von Extremwetterereignissen sowie schadenbeeinflussende Faktoren eingegangen. Der Fokus der spezifizierten Klimawirkung liegt auf Gebäudeschäden durch Starkregen und Flusshochwasser, welchen im Anschluss je ein Unterkapitel gewidmet ist.

Winterstürme und andere Winterschäden verursachten in Deutschland von 1980 bis 2018 inflationsbereinigte Gesamtschäden von circa 35 Milliarden Euro, Überschwemmungen und Sturzfluten circa 32 Milliarden Euro (Munich RE 2019). Konvektive Sturmereignisse, zu denen auch Hagel zählt, führten zu Schäden in Höhe von circa 31 Milliarden Euro, von welchen über die Hälfte in den letzten zehn Jahren entstanden. Dieser Trend zeigt sich weltweit.

Während von den oben genannten Schäden durch Überschwemmungen und Sturzfluten weniger als ein Viertel durch Versicherungen abgedeckt waren, lag die Versicherungsquote von Winterschäden und konvektiven Sturmereignissen bei über 60 Prozent (Munich RE 2019). In der Wohngebäudeversicherung verursachen Sturm und Hagel mit Abstand die größten wetterbedingten Schäden (GDV 2019c). Zwischen 2002 und 2018 entfielen 25 Prozent des Schadensaufwandes auf diese Art von Ereignissen (knapp 18 Milliarden Euro), während weitere Naturgefahren nur vier Prozent der versicherten Schäden an Wohngebäuden verursachten (knapp drei Milliarden Euro). Im Gegensatz zur nahezu in allen Haushalten vorhandenen Versicherung gegen Sturm und Hagel, waren im Jahr 2018 nur circa 43 Prozent der Gebäude über eine erweiterte Elementarschadenversicherung gegen weitere Naturgefahren versichert (GDV 2019c; UBA 2019b). Der Anteil dieses Versicherungsschutzes ist regional sehr unterschiedlich und reicht von 21 Prozent in Bremen bis 94 Prozent in Baden-Württemberg (GDV 2019c). Die Versicherungsquote steigt allerdings seit 2002 stetig an und hat sich in den letzten 15 Jahren verdoppelt.

Die Beeinträchtigung von Gebäuden durch Starkregen und Flusshochwasser sinkt mit zunehmender Gebäudehöhe (Merz et al. 2010). Keller sind das am häufigsten betroffene Geschoss, weshalb deren Existenz und Nutzung einen hohen Einfluss auf die Schadenshöhe hat (Weller et al. 2016; Spekkers et al. 2017). Des Weiteren beeinflusst die Art der verbauten Materialien das Schadensausmaß (Merz et al. 2010). Beispielsweise spielt es eine Rolle, welche wärmedämmenden Verbundmaterialien verbaut wurden. Dies kann darüber entscheiden, ob eine Sanierung möglich, oder der Abriss notwendig ist. Eine wichtige Rolle spielen zudem Kontaminationen mit Schmutzwasser oder wassergefährdenden Stoffen wie Chemikalien oder Ölen (Spekkers et al. 2017). Diese können zu einer erheblichen Vergrößerung von über 35 Prozent des Schadensausmaßes beziehungsweise der Sanierungskosten führen (Kreibich et al. 2014). Die Kontamination des Wassers kann dabei entweder vor dem Eindringen ins Gebäude erfolgen oder im Gebäude selbst (zum Beispiel durch eine Ölheizung). Die Sensitivität von Gebäuden gegenüber Sturmschäden wird insbesondere durch die Gebäudealterung und die Bauweise von Gebäuden beeinflusst (BBSR 2018).

Durch Maßnahmen innerhalb von Gebäuden, zum Beispiel die Sicherung wassergefährdender Stoffe, können Schäden reduziert werden (Merz et al. 2010). Inwieweit solche Maßnahmen ergriffen werden hängt unter anderem vom Risikobewusstsein der Bevölkerung ab (Rözer et al. 2016; Spekkers et al. 2017). Dieses kann durch Erfahrungen, zum Beispiel mit Überschwemmungen, steigen (Rözer et al. 2016). Von hoher Bedeutung ist zudem die Effektivität von Frühwarn-

systemen (Kreibich et al. 2017). Laut dreistufigem Warnmanagement des Deutschen Wetterdienstes wird 48 bis 120 Stunden vor einer eintretenden Wettergefahr eine Frühwarninformation herausgegeben (DWD 2017). Eine Vorabinformation erfolgt 12 bis 48 Stunden und eine (Un)wetterwarnung frühestens 12 Stunden vor einem eintretenden Ereignis. Während bei Flusshochwassern heutzutage bereits mehrere Tage im Voraus eine Frühwarnung möglich ist, lassen sich konvektive Ereignisse wie Starkregen bislang oft nur wenige Stunden voraussagen, weshalb meist nur relativ kurzfristige Unwetterwarnungen erfolgen können (Kind et al. 2019).

Für Hagel und Sturm liegen keine beziehungsweise keine belastbaren Projektionen vor. Allerdings gibt es deutliche Hinweise darauf, dass Sturmschäden in Zukunft zunehmen könnten, auch weil bereits eine geringe Erhöhung der Windgeschwindigkeiten zu erheblich mehr Gebäudeschäden führen kann (Weller et al. 2016).

Auch bei Schnee- und Eisdruck ist die Datenverfügbarkeit eingeschränkt. Insbesondere projizierte Daten liegen nicht vor. Um die potenziellen Schäden durch Schnee- und Eisdruck zu beurteilen ist nicht nur die Schneemenge ausschlaggebend, sondern insbesondere die tatsächliche Schneelast (Weller et al. 2016). Diese steigt, wenn der Schnee nass ist, sich durch eine längere Liegezeit verdichtet und weiterer Niederschlag als Schnee oder Wasser abgelagert wird oder sich durch häufigen Frost-Tau-Wechsel Eisschichten bilden.

2.2.1.1 Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) versteht unter Starkregen eine hohe Menge an Niederschlag pro Zeiteinheit (DWD 2019b). Während sich Gebäude, die durch Flusshochwasser beschädigt werden, in unmittelbarer Umgebung eines Flusses befinden, kann Starkregen überall auftreten.

Zwischen 2002 und 2018 entstanden durch mehr als 11.000 Starkregenereignisse Gesamtschäden im Wert von 6,7 Milliarden Euro an rund 1,6 Millionen Wohngebäuden (GDV 2019a). Die meisten Schäden entstanden bei Starkregendauern von circa drei Stunden. Deren Häufigkeit war etwa gleichmäßig über das Bundesgebiet verteilt. Regen mit über 12 Stunden Andauer trat vermehrt in Gebirgsregionen auf, mit vergleichsweise geringem Schadensausmaß. Im trockenen Jahr 2018 traten die meisten Starkregenereignisse (seit 2002) auf, es besteht also kein direkter Zusammenhang zum Gesamtniederschlag. Die Höhe von Gebäudeschäden hängt neben der Intensität des Starkregenereignisses maßgeblich von der Siedlungsstruktur, individuellen Gebäudeeigenschaften sowie dem Verhalten von Betroffenen ab (Merz et al. 2010; Spekkers et al. 2017; Die Deutschen Versicherer 2021).

In Gebieten mit hoher Bodenversiegelung beziehungsweise geringen Versickerungsraten gehen Starkregenereignisse mit einem hohen Oberflächenabfluss einher (BBSR 2018). Sind kommunale Abwasser- und Entwässerungssysteme durch diesen Abfluss überlastet, können urbane Sturzfluten entstehen (siehe „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“). Neben dem Versiegelungsgrad sind dafür die Bodenart, der Grad der Verschlammung, die Vegetationsbedeckung, die Landnutzung und das Relief wichtige Einflussgrößen.

Welche Flächen bei Starkregenereignissen überflutet werden könnten, lässt sich in Starkregengefahrenkarten darstellen, welche auf kommunaler Ebene teilweise bereits existieren und sich bislang unterschiedlicher Modellierungsansätze bedienen (Kind et al. 2019; Die Deutschen Versicherer 2021). Welche Schäden durch Oberflächenabflüsse in den betroffenen Gebieten tatsächlich entstehen, hängt von deren Schadenspotenzialen ab. Werden Abflüsse (zum Beispiel durch bauliche Maßnahmen) in Bereiche geleitet, die durch den Wasserrückhalt nicht oder kaum beschädigt werden, fallen Schäden geringer aus.

Zusätzlich zu den eingangs beschriebenen allgemeinen Sensitivitätsfaktoren von Gebäuden gegenüber Überschwemmung (wassergefährdende Stoffe, Unterkellerung, Baumaterialien) gibt es einige spezifische Faktoren, welche die Starkregensensitivität von Gebäuden beeinflussen. So kann unzureichender Schlagregenschutz von Kellerfenstern oder der Ausbau von Dachgeschossen, Dachterrassen und Balkonen zu höheren Starkregenschäden führen (Bauherren-Schutzbund e.V. et al. 2018; BBSR 2018). Weiterhin wird die Starkregenanfälligkeit von Gebäuden durch geringe Gebäudesockelhöhen, unzureichend dimensionierte Entwässerungssysteme und ungünstige Dachbauweisen erhöht (Weller et al. 2016; Bauherren-Schutzbund e.V. et al. 2018; BBSR 2018). Dachdurchdringungen (also Stellen, an denen zum Beispiel Schornsteine, Anschlussleitungen, Lüftungsröhren durch die Dachfläche hindurch nach außen dringen) oder Materialwechsel (zum Beispiel durch Dachgauben, Sheddach oder Ähnliches) spielen dabei ebenso eine Rolle wie die Dachneigung. Starkregen kann bei fehlenden Dachüberständen die Fassade beschädigen (je nach deren Bauweise). Die Folgen können sich durch den Eintritt der Wassermengen in die Bauteile bemerkbar machen und zu Durchfeuchtungsschäden führen. Notüberläufe an Dachrinnen, Balkonen und Terrassen können hingegen das Schadensrisiko senken. Weitere gebäudebezogene Faktoren sind die Bauweise der Außenwand, das Baujahr sowie Instandhaltung, Wartung und Modernisierung von Dach- und Entwässerungssystemen.

In den meisten Studien zur Starkregenintensität in Deutschland wurden hohe Quantile der täglichen Niederschlagssummen untersucht (KLIWA 2019). Niederschlagsereignisse mit hohen Regemengen über eine Dauer von 24 Stunden sind heutzutage im Winter um etwa 25 Prozent häufiger als noch vor 65 Jahren (Becker et al. 2016). Für sommerliche Starkregenereignisse, welche für Gebäudeschäden maßgeblich sind, lässt sich aus den Tagessummen kein Trend ableiten. Regionale Untersuchungen hochaufgelöster Niederschlagsdaten auf Basis von Minuten- und Stundenwerten zeigten hingegen eine Zunahme kurzer, hochintensiver Starkregenereignisse im Sommer. Zeitreihen in dieser hohen Auflösung sind allerdings noch zu kurz, um belastbare Aussagen treffen zu können.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Derzeit liegen keine ausreichenden bundesweiten Daten vor, um den klimatischen Einfluss auf zukünftige Gebäudeschäden durch Starkregen räumlich differenziert darstellen zu können. Verfügbare Klimaprojektionen des Deutschen Wetterdienstes zu Starkregentagen mit Niederschlägen über 20 Millimeter eignen sich für die Analyse der Klimawirkung nur bedingt, da Starkregenschäden an Gebäuden primär durch kurze, intensive Niederschlagsdauern entstehen (GDV 2019a). Dazu wären räumlich und zeitlich hochaufgelöste Niederschlagsprojektionen nötig, welche konvektive Ereignisse berücksichtigen (KLIWA 2019). Alternativ könnten klimawandelbedingte Veränderungen von Starkregen über eine Verschiebung von Jährlichkeiten abgebildet werden. Damit würde beispielsweise die zukünftige Häufigkeit eines heute durchschnittlich alle 20 Jahre auftretenden Starkregenereignisses dargestellt. Dieses Verfahren ist bereits gängige Praxis bei der Untersuchung von Flusshochwassern (siehe 2.2.1.2). Ergebnisse aktuell laufender Forschungsprojekte zur Modellierung konvektiver Niederschläge sowie zu Jährlichkeiten von Starkregenereignissen könnten als Grundlage für zukünftige Starkregenprojektionen dienen.

Wenngleich die räumliche Verteilung zukünftiger Starkregenereignisse noch unklar ist, kann generell mit einer klimawandelbedingten Intensivierung gerechnet werden (Becker et al. 2016; KLIWA 2019). Die Intensität von Extremniederschlägen kann dabei überproportional zur erhöhten Wasseraufnahmekapazität der Luft steigen. Beispielsweise ergab die Auswertung hochaufgelöster Messdaten verschiedener deutscher Städte eine Intensitätszunahme von konvektiven Niederschlägen um bis zu 14 Prozent pro Grad Celsius Erwärmung (Berg und Haerter 2013).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 2: „Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Kernaussagen zu „Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen“

- ▶ Sommerliche Starkregenereignisse mit kurzen, intensiven Niederschlagsdauern sind für Schäden an Gebäuden maßgeblich.
- ▶ Zukünftige Gebäudeschäden durch Starkregen können derzeit noch nicht räumlich differenziert dargestellt werden, da dazu hochaufgelöste Niederschlagsprojektionen nötig wären, welche konvektive Ereignisse berücksichtigen.
- ▶ Generell ist mit einer klimawandelbedingten Intensivierung von Starkregen zu rechnen, da mit steigenden Durchschnittstemperaturen auch die Intensität von Extremniederschlägen zunimmt.

2.2.1.2 Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Flusshochwasser werden im Folgenden erhöhte Pegelstände von Fließgewässern bezeichnet, welche von starken oder langanhaltenden Niederschlägen sowie tauendem Schnee verursacht werden (UBA 2019b). Viele Zusammenhänge und methodische Aspekte bezüglich der Genese und klimawandelbedingter Änderungen von Flusshochwassern werden im Teilbericht 3 „Klimarisiken und Anpassung im Cluster Wasser“ erläutert (siehe „Hochwasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“). Seeseitige Pegelstandserhöhungen von Flüssen im Tidebereich werden im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ behandelt.

Durch extreme Niederschläge (gegebenenfalls in Kombination mit Schneeschmelze) ausgelöste Flusshochwasser sind in Deutschland die Naturereignisse mit dem potenziell höchsten wirtschaftlichen Schadensausmaß (Bronstert et al. 2017). Neben Überschwemmungen, die unmittelbar aus dem Uferübertritt des Wassers folgen, können Flusshochwasser auch einen Grundwasseranstieg verursachen, der zu Gebäudeschäden führen kann (LAWA 2017). Diese indirekten Hochwasserschäden sind oft nicht versichert (GDV 2018).

Mehr als ein Drittel der seit 1980 in Deutschland eingetretenen Schäden durch Überschwemmungen und Sturzfluten fielen auf die beiden Sommerhochwasser 2002 und 2013 (Munich RE 2019). Beide Ereignisse trafen insbesondere die Einzugsgebiete von Elbe und Donau (DKKV und Universität Potsdam 2015). Im Jahr 2013 waren zudem die Einzugsgebiete von Rhein und Weser betroffen. Obwohl das Hochwasser von 2013 hydrologisch als das stärkste seit über 60 Jahren betrachtet werden kann, zog es deutlich weniger Schäden nach sich als das Hochwasserereignis 2002 (Thieken et al. 2016; Munich RE 2019). Ein Grund dafür ist eine Verbesserung des Hochwasserrisikomanagements (Thieken et al. 2016).

Ein wichtiger Schwellenwert für das Hochwasserrisikomanagement stellt die Abflussmenge dar, deren Bezeichnung sich nach der Jährlichkeit richtet. Bei Jahrhunderthochwassern wird eine Abflussmenge erreicht, die im statistischen Mittel alle 100 Jahre vorkommt (100-jährlicher Abfluss). Diese wird als Szenario für die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten durch die Bundesländer herangezogen (Dehnhardt et al. 2008). Nach europäischer Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie werden Ereignisse mit 100-jährlichem Abfluss als „mittlere Hochwasser“ bezeichnet.¹ Welche Gebiete potenziell durch Hochwasser wie stark betroffen sind beziehungsweise wie hoch die Risiken für Hochwasserschäden einzustufen sind, wird in Hochwassergefahren- beziehungsweise Hochwasserrisikokarten der Bundesländer beschrieben.² In beiden Kartentypen werden Hochwasserereignisse mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit – HQ_{extrem} , HQ_{100} – differenziert dargestellt. Außerdem werden Hochwasserschutzanlagen dargestellt. Diese werden bei der Modellerstellung für HQ_{100} berücksichtigt, bei der Ermittlung der sich einstellenden Hochwassergefahrenflächen und Wassertiefen im Fall eines HQ_{extrem} werden die Schutzanlagen jedoch in der Regel vernachlässigt, da in diesem Fall von deren Überströmung beziehungsweise Durchbrechung auszugehen ist. Um mit klimawandelbedingten Unsicherheiten umzugehen, berücksichtigen einige Bundesländer bereits jetzt potenziell steigende Abflüsse im Hochwassermanagement (KLIWA 2018). Beispielsweise sollen neue Hochwasserschutzanlagen in Bayern so ausgelegt werden, dass sie einem 15 Prozent über dem 100-jährlichen Abfluss liegendem Ereignis standhalten. Zudem werden viele Anlagen nachrüstfähig konzipiert.

¹ EU-RL – Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.

² Die nationalen Hochwassergefahren- und Risikokarten für Deutschland können über das Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) eingesehen werden: <https://geoportal.bafg.de/karten/HWRM>.

Flusshochwasser traten in der Vergangenheit sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr auf (UBA 2019b). Die im Monitoringbericht zur deutschen Anpassungsstrategie untersuchten Hochwassertage zeigen bislang keinen Trend bezüglich extremer Flusshochwasser in der Größenordnung HQ₁₀₀ auf. Räumliche Schwerpunkte ergaben sich jeweils aus besonderen Witterungsverhältnissen, welche jedoch bislang keine systematischen Muster erkennen lassen. Rückblickende Betrachtungen zeigen in einigen Regionen Deutschlands eine Zunahme der jährlichen Hochwasserabflüsse (MHQ), die jedoch in der Regel mit keinen nennenswerten Schäden einhergehen. Den vorliegenden Zukunftsprojektionen zufolge setzt sich diese Tendenz unter den Rahmenbedingungen des Klimawandels fort. Zukünftige Entwicklungen extremer Flusshochwasser sind in vielen Punkten noch Gegenstand der Forschung. Einzelheiten hierzu finden sich im Kapitel „Hochwasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“.

Schadensabschätzungen auf Grundlage von Klimaprojektionen geben Hinweise darauf, dass Schäden durch Flusshochwasser ohne zusätzliche Anpassungsmaßnahmen in Zukunft klimawandelbedingt zunehmen könnten (Hattermann et al. 2016). Allerdings geht – ebenso wie die Modellierung extremer Flusshochwasser – auch die Schadensmodellierung solcher Ereignisse mit hohen Unsicherheiten einher (Falter et al. 2016; Hattermann et al. 2016; Figueiredo et al. 2018). Ein Ansatz diese zukünftig zu reduzieren wäre die Bildung von Ensembles verschiedener Schadensmodelle (Figueiredo et al. 2018). Die Übertragbarkeit von Schadensmodellen könnte zudem verbessert werden, indem Modelle mit heterogeneren Daten vergangener Hochwasserereignisse trainiert werden (Wagenaar et al. 2018). Dem Mangel an gebäudespezifischen Daten könnte in Zukunft mit dreidimensionalen Stadtmodellen und Fernerkundungsdaten begegnet werden (Schröter et al. 2018). Insgesamt ist die Analyse der Auswirkungen extremer Hochwasserereignisse hinsichtlich Schäden an Gebäuden aufgrund spezieller methodischer Herausforderungen ein Thema, zu dem es weiterer Forschung bedarf.

Grundlage der Operationalisierung

Die Einschätzung der Klimawirkung kann hier aufgrund der großen Unsicherheiten nur sehr grob vorgenommen werden. Grundlage sind die Änderungen des Abflusses extremer Flusshochwasser (100-jährlicher Abfluss, HQ₁₀₀, *Indikatoren-ID: WW-KL-03*³), die im Kapitel „Hochwasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ ausführlich dargestellt sind. Dazu wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME durchgeführt. Die Analyse extremer Hochwasserereignisse unter den Bedingungen des Klimawandels bringt große Herausforderungen mit sich. Hochwasserereignisse und die hochwasserauslösenden Witterungsbedingungen sind selten und diesbezügliche Änderungen schon in der Beobachtung statistisch nur schwer greifbar. Weiterhin ergeben sich aus den Beobachtungsdaten Unsicherheiten hinsichtlich der Extreme. Letztlich kann eine Ergebnisbandbreite für das Ensemble der Klimaprojektionen (15. und 85. Perzentil) nicht ausgewiesen werden (für weitere Details siehe „Hochwasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“).

Die Möglichkeiten einer belastbaren Zukunftsprojektion und Änderungsanalyse von Hochwasserextremen in der Größenordnung eines heutigen HQ₁₀₀ oder höher sind also derzeit begrenzt. Das Thema ist Gegenstand laufender Forschung (zum Beispiel im Rahmen der Arbeiten des BMVI-Expertennetzwerks und weiterer Aktivitäten der Bundesländer). Eine Interpretation und Verwendung für Bemessungsfragen ist nicht, beziehungsweise nur unter großen Vorbehalten, möglich. Gegebenenfalls können aber grundlegende Änderungsrichtungen und regionale Muster aus den bisher vorliegenden Analysen hilfreich sein. Diese Daten liefern ein Indiz für mögliche Gefahren von Schäden an Gebäuden. Detaillierte Informationen zur Sensitivität von Gebäuden

³ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

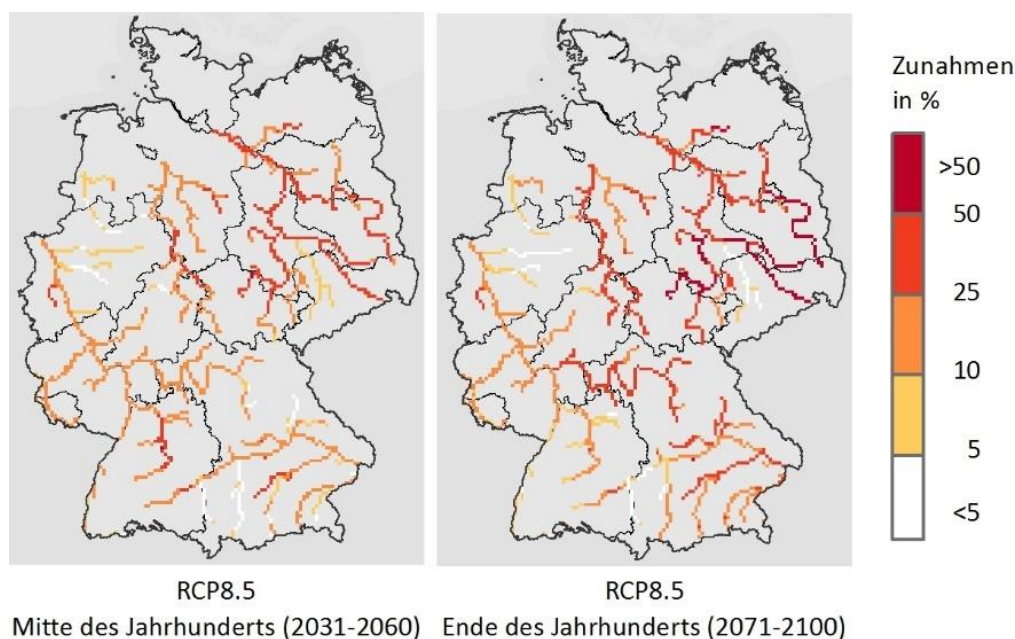
oder zu Gebäuden entsprechenden Sachwerten (etwa als monetäre Größen) liegen nicht als quantitative Datensätze vor, mittels derer regional differenzierte Analysen zu konkreten Schäden an Gebäuden möglich wären.

Als Bezugswert für die Bewertung der zukünftigen Änderungen wurde an jedem Punkt ein simulierter Abfluss HQ_{100} angesetzt. Eine kartographische Darstellung des Bezugszeitraums erübrigt sich somit.

Ergebnisse für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts

Die im Abschnitt "Grundlagen der Operationalisierung" genannten Besonderheiten sind bei der Interpretation der Karten (Abbildung 1) zu beachten. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der gewählten Methode keine Ergebnisbandbreiten angegeben werden können und eine Verknüpfung mit konkreten Gebäudedaten bislang nicht gegeben ist.

Abbildung 1: Änderungen simulierter Hochwasserabflüsse mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren (HQ_{100}) in 30-Jahreszeiträumen in der Mitte und am Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971 bis 2000



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Die projizierten Änderungen extremer Hochwasserabflüsse (HQ_{100}) sind für die Jahrhundertmitte in Alpennähe (fünf Prozent bis zehn Prozent) und im Westen (zehn Prozent bis 15 Prozent) Deutschlands geringer als in der Mitte (15 Prozent bis 20 Prozent) und im Osten Deutschlands (25 Prozent bis 30 Prozent, regional höher). Für das Ende des Jahrhunderts ergeben sich in einigen Regionen nur noch geringe weitere Änderungen. Dies trifft vor allem auf den Rhein und seine Nebengewässer (mit Ausnahme des Mains), die Ems, die Weser sowie die Donau bis zur Mündung des Inn zu. Im Osten Deutschlands zeigen sich stellenweise jedoch weitere Anstiege um zehn Prozent bis 15 Prozent.

Die vorliegenden Auswertungen liegen trotz methodischer Unterschiede in einem ähnlichen Wertebereich wie regionale Studien zum Beispiel in Bayern und Baden-Württemberg (zum Beispiel Katzenberger 2012) oder Niedersachsen (NLWKN 2018). Die oben genannten Vorbehalte hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse gelten dennoch. Aussagen zur Richtung der Änderungen sind möglich, auch können aufgrund des bundesweit einheitlichen Ansatzes regionale Unterschiede rudimentär erklärt werden.

Insgesamt kann eine zunehmende Gefahr von Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser angenommen werden.

Bewertung des Klimarisikos⁴

Tabelle 3: „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“: 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 „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“

- Die Ausprägung extremer Hochwasserereignisse (HQ₁₀₀ und höher), die Schäden an Gebäuden bedingen können, hängen von zahlreichen Faktoren ab, die zudem je Ereignistyp unterschiedlich kombiniert sein können. Projektionen extremer Hochwasser unterliegen also Unsicherheiten und sind Gegenstand aktueller Forschung.
- Es gibt Hinweise darauf, dass Schäden durch Flusshochwasser ohne zusätzliche Anpassungsmaßnahmen in Zukunft klimawandelbedingt zunehmen könnten.
- Für die Mitte des Jahrhunderts fallen die projizierten Änderungen der 100-jährlichen Hochwasserabflüsse im Süden (nahe der Alpen) und Westen Deutschland geringer aus als in der Mitte und im Osten Deutschlands. Für das Ende des Jahrhunderts zeigen sich weitere (deutlichere) Änderungen vor allem im Osten Deutschlands.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“

Zu den Sensitivitätsfaktoren in Bezug auf Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser zählen die Größe und Kubatur eines Bauwerks (Höhe, Umfang, Volumen), die Bauweise, Gebäudetechnik und Gebäudenutzung sowie Bauteilaufbauten beziehungsweise verwendete Bauprodukte. Der Parameter Bauweise, der auch Gebäudetechnik und -nutzung einschließt, umfasst zum Beispiel Brüstungshöhen und Fensterarten, Höhe des Parterregeschosses über der Geländehöhe, Geschosse unter Geländeoberkante, Unterkellerung, hochwertige Nutzung und Unterbringung sensibler Technik, zum Beispiel Büro- oder Wohnräume, Rechenzentren oder Versorgungseinrichtungen wie Wasser, Abwasser, Strom und Kommunikation sowie das Vorhandensein oder die Lagerung wassergefährdender Stoffe (zum Beispiel Öl, Chemikalien) (BBSR 2010; Stock 2015). An hochwassergefährdeten Standorten erhöhen solche Gebäudeausstattungsmerkmale (insbesondere in überflutungsgefährdeten Gebäudeteilen) das Schadenspotenzial. Die räumliche Exposition wird bei dieser Klimawirkung durch die Entfernung beziehungsweise die relative Lage (auch Höhenlage, Hanglage) von Gebäuden zu Flüssen und deren Einzugsgebieten bestimmt (Stock 2015). Die hier genannten Faktoren bilden Ansatzpunkte für Anpassungsprozesse, um das Schadenspotenzial von Gebäuden infolge von klimawandelbedingt intensiveren Hochwasserereignissen einzudämmen.

⁴ Da insgesamt große Unsicherheiten hinsichtlich der Hochwasserprojektionen vorliegen, keine Bandbreiten (zwischen 15. und 85. Perzentil beziehungsweise optimistischem und pessimistischem Fall) ausgewiesen werden können und es an flächendeckenden (und räumlich differenzierten) Daten zur Gebäudesensitivität mangelt, beruht die Bewertung des Klimarisikos auf einem Expertenurteil.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Hinsichtlich der Anpassungskapazität in Bezug auf Gebäude ist grundsätzlich zwischen bereits bestehenden und noch zu errichtenden Gebäuden zu unterscheiden. Beschlossene Maßnahmen zur Anpassung nehmen sowohl den Gebäudeumbau als auch die Neuerrichtung von Gebäuden in den Blick. Die Gebäudeneukonzipierung (Lage, Größe, Materialien, Raumverwendung) kann Klimawandel-sensiblen Standards leichter folgen als es bei der baulichen Anpassung bestehender Gebäude der Fall wäre, allen voran hinsichtlich der Lage, aber auch der Bauweise und der Bauprodukte (Golz et al. 2015; Albrecht et al. 2018). Hochwasserangepasstes Bauen (an Gefährdungsstandorten) ist beispielsweise bereits Teil von Baugenehmigungsverfahren. Im Bestand ist die – nachträgliche Regulierung – schwieriger; beispielsweise wäre die Einführung bauordnungsrechtlicher (verpflichtender) Vorgaben im Sinne des hochwasserangepassten Nachrüstens bei Bestandsgebäuden mit höheren Hürden verbunden als bei Neubauten. Für überschwemmungsgefährdete Gebiete existieren zumindest teilweise Regularien zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen sowie zum Einsatz von Ölheizungen (Albrecht et al. 2018). So ist die Installation von Heizölverbraucheranlagen in Überschwemmungsgebieten und weiteren Risikogebieten im Hochwasserschutzgesetz geregelt (§78 WHG).

Überdies spielen für die Betrachtung der Anpassungskapazität in Bezug auf flusshochwasserbedingte Gebäudeschäden Siedlungsstrukturen als übergeordnete Ebene eine wichtige Rolle, da auch hier Ansatzpunkte für die Planung und Umsetzung von Anpassung liegen, die sich unmittelbar auf die Anpassungskapazität auf der Gebäudeebene auswirken. In diesem Zusammenhang stellt die Städtebauförderung – eine Verwaltungsvereinbarung, durch die vonseiten des Bundes und der Länder Finanzhilfen für die Stadt- und Gemeindeentwicklung und -erneuerung bereitgestellt werden – ein bedeutendes Förderinstrument dar. Insbesondere nach ihrer 2020 in Kraft getretenen Reform kann sie eine deutliche Stärkung der Klimafolgenanpassung auf kommunaler Ebene bewirken. So sind inzwischen Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel (neben Klimaschutzmaßnahmen) und zur Verbesserung der grünen Infrastruktur nicht nur explizit förderfähig, sondern stellen auch eine der Fördervoraussetzungen dar. Solche Maßnahmen umfassen beispielsweise die Bodenentsiegelung, das Flächenrecycling, den Erhalt und die Erweiterung von Grünflächen und Freiräumen sowie deren Vernetzung und die Erhöhung der Biodiversität (VV Städtebauförderung 2020.).

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung beziehungsweise Minderung von klimawandelverknüpften Hochwasserschäden an Gebäuden beitragen sollen:

Tabelle 4: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ 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. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.7	Hochwassergefahrenkarten (speziell Harmonisierung; inklusive Finanzierungsabsicht)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Motivation und Akzeptanz; Wissen	Hochwassergefahrenkarten dienen sowohl Kommunen als Grundlage für die Planung von Vorsorge- und Notfallmaßnahmen als auch Grundstücks- und Gebäudeeigentümern zur Information und Bewusstseinsbildung hinsichtlich der Hochwassergefährdung und der Größe und Lage von Überschwemmungsgebieten; sie leisten einen Beitrag zur Verringerung der standortbedingten Gefährdung von Gebäuden und Verkehrsinfrastrukturen.
6.1 & 7.2*; 2.32	Anpassungsbedarf bzw. klimafeste Ausgestaltung bestehender technischer Normen und Regelwerke im Bauwesen; Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen;	Aufbau von Wissensgrundlagen, die zu einer angemesseneren Berücksichtigung des Klimawandels in Normen für das Bauwesen beitragen können; Identifizierung von Normen und technischen Regelwerken des Bauwesens, die von extremen Wetterereignissen und Klimaveränderungen betroffen sein können (auf der einen Seite) sowie solcher, die Anpassung an die Folgen des Klimawandels unterstützen können (auf der anderen Seite); Neben DIN-Normen auch Normen anderer regelsetzender Institutionen in Deutschland, etwa die VDI-Richtlinien oder das DWA-Regelwerk; Etablierung baulicher Standards, die einer klimawandelbedingt höheren Frequenz und Intensität (extremer) Hochwasserereignisse (und anderer Extremereignisse wie Starkregen, Kanalrückstau, Hagel, Hitze, Trockenheit) Rechnung tragen und dadurch zur Verringerung der Sensitivität von Gebäuden gegenüber solchen Hochwasserereignissen (und anderen Extremereignissen) beitragen. Dazu sollen Kenntnisse über die mögliche klimawandelbedingte Veränderung von Hochwasserereignissen in die technischen Regelwerke zur Wartung, Instandhaltung und zum Neubau von Gebäuden einfließen. [siehe auch BBSR 2020 zur Weiterentwicklung und Konkretisierung klimaangepassten Bauens (BBSR 2020)]; Beurteilungshilfen, Gebietsbelastungstabellen u. ä. wünschenswert, um sich verstärkenden Lastannahmen auf Gebäude und Bauwerke durch Hochwasser (und andere Extremereignisse) mit sicherem bautechnischen Handeln zu begegnen.
6.14	Bautechnische Lösungen für klimaangepasstes Bauen	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Verschiedene Veröffentlichungen und Forschungsprojekte zielen gemeinsam auf die Zusammenstellung der einzelnen Vulnerabilitäten der baulichen Infrastruktur (Gebäude und Liegenschaften) gegenüber den verschiedenen Folgen des Klimawandels, um sukzessive bautechnische Lösungsansätze hierfür zu entwickeln.

Bei den beschlossenen Anpassungsaktivitäten kommen vor allem Maßnahmen, die den Dimensionen Regulierung, Wissen und Technologien zuzurechnen sind, als Hebel zum Einsatz, um Anpassung an potenziell zunehmende Hochwassergefährdung von Gebäuden zu stärken und zu implementieren. Hinzu kommt als akzeptanz- und motivationssteigernde Maßnahme die Entwicklung eines Geoinformationssystems zur bundesweiten Risikoabschätzung von zukünftigen Klimafolgen für Immobilien (wobei es sich hierbei um eine bereits in Umsetzung befindliche Maßnahme handelt). Durch die damit einhergehende Informationsverbreitung und Schärfung des Risikobewusstseins kann auf Entscheidungen über den Gebäudestandort, die Bauweise (zum Beispiel Anhebung des Erdgeschosses, Verzicht auf Kellerräume), die Raumnutzung (zum Beispiel Verzicht auf Öltank und Heizungsanlage in Kellerräumen), die Materialverwendung (zum Beispiel Verbundsysteme/Schichtung verschiedener Werkstoffe zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit oder zur Möglichkeit einfacher Rückbaubarkeit von Böden, Decken, Wänden und Fassaden) und den Einsatz bestimmter Zusatzelemente (zum Beispiel hochwasserangepasste Elektroinstallationen, Sicherung von Heizöltanks, bauliche Barrieren zur Sicherung von Kellerschächten) eingewirkt werden; sowohl bei Neuerrichtungen als auch beim Gebäudeumbau (BBSR 2016b; GDV 2019b; Deutscher Städtetag 2019). Eine Handlungsverpflichtung ergibt sich daraus nicht; aber die Stärkung des Risikobewusstseins stellt auf individueller Ebene (Eigentümer) eine wichtige Voraussetzung für die Bereitschaft zum hochwasserangepassten Bauen dar. Eine umfassende Informationsbereitstellung zu den Möglichkeiten und Notwendigkeiten hochwasserangepassten Bauens für die Bevölkerung ist weiterhin notwendig. Risikobewusstsein allein genügt indes nicht, um Vorsorge tatsächlich zu realisieren. Psychologische Einflussfaktoren, nämlich insbesondere das Bewusstsein über die eigene Verantwortung und die Möglichkeit der Selbstwirksamkeit sowie kollektive Überzeugungen, spielen hierbei eine wesentliche Rolle. Die Beeinflussung dieser Faktoren könnte dazu beitragen, dass (Eigen-)Vorsorge tatsächlich betrieben würde. Dabei könnten sich, laut einer jüngeren Studie zur Eigenvorsorgemotivation, folgende partizipative Verfahren als hilfreich erweisen: die gemeinsame Entwicklung positiver Visionen einer „naturgefahrensicheren Zukunft“ und Ansätze zum Erreichen dieses Ziels; gemeinsame Katastrophenschutz- und Vorsorgeübungen von im Katastrophenschutz Tätigen und Bewohnern eines Naturgefahren-Gebiets; persönliche Berichterstattung Betroffener im Rahmen von Beteiligungsveranstaltungen (Grothmann 2017).

Zudem ist, um über Einzelmaßnahmen durch Gebäudeeigentümer hinauszukommen, die Schaffung gesetzlicher Vorgaben und deren Konkretisierung durch Standards und technische Regelwerke unerlässlich. DIN-Normen zum klimaangepassten Bauen bei Gebäuden stellen hierfür bereits wichtige Grundlagen dar (Stock 2015). Außerdem setzt sich ein laufendes Forschungsprojekt des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und des Umweltbundesamts (UBA) sowohl mit Normen und technischen Regelwerken des Bauwesens auseinander, die von extremen Wetterereignissen und Klimaveränderungen betroffen sein können als auch mit Normen, die Klimaanpassung unterstützen können⁵.

Hemmnisse für das Wirksamwerden der hier beschriebenen beschlossenen Maßnahmen können sich aus dem begrenzten Einflussbereich der öffentlichen Hand auf Bestandsgebäude und Neubauten ergeben, da sich ein erheblicher Teil potenziell betroffener Immobilien in Privatbesitz befindet. Außerdem ist die Umsetzbarkeit von Anpassungsmaßnahmen bei historischen und/oder denkmalgeschützten Gebäuden eingeschränkt und sollte nicht im Zielkonflikt mit barrierefreiem Bauen stehen.

⁵ Siehe auch: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlima-Bauen/2019/klimaanpassung/01-start.html#Projektsteckbrief>

Weiterreichende Anpassung

Unter Berücksichtigung der bereits konkret beschlossenen Maßnahmen und Instrumente werden im Folgenden Möglichkeiten für eine weiterreichende Anpassung an klimawandelbedingt steigende Hochwasserrisiken für Gebäude aufgezeigt (Tabelle 5). Zu beachten ist generell, dass bautechnische Lösungen für klimaresilientes, speziell auch hochwasserangepasstes Bauen bekannt und (aus baulich-technischer Sicht) ohne übermäßige Schwierigkeiten umsetzbar sind. Nicht zu vernachlässigen sind indes die damit einhergehenden Kosten. Von der Finanzierungskapazität bautechnischer Lösungen hängt jedoch deren Wirksamwerden als Anpassungsmaßnahme ab. Neben bautechnischen Lösungen tragen aber auch hochwasserangepasste Standortentscheidungen zur Erhöhung des Resilienzgrades von Gebäuden bei. Zur tatsächlichen – großflächigen – Anwendung klimaangepasster Bauweisen und auch zur Vermeidung von Neubebauung an besonders hochwassergefährdeten Standorten bedarf es verpflichtender Impulse (bauplanungs- und bauordnungsrechtliche Festschreibung, also Baugesetzbuch (BauGB), Raumordnungsgesetz (ROG) des Bundes und Bauordnungen der Länder; zumal Hochwasserschutzmaßnahmen in den Verantwortungsbereich der Länder fallen). In diesem Zusammenhang ist auch der erste länderübergreifende Raumordnungsplan für den Hochwasserschutz (für das gesamte Bundesgebiet) (BRPH) zu erwähnen, der derzeit durch das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) aufgestellt wird.⁶

Tabelle 5: Möglichkeiten weiterreichender Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene ⁷	Charakteristika
Überprüfung der Ausweisung von Hochwassergefährdeten Standorten (anpassungssensitive Definition von Gefährdungsgebieten, d.h. Anpassung der rechtlichen Grundlage zur Definition von Gefährdungsgebieten)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Freihaltung von Überflutungsflächen von (weiterer) Siedlungsentwicklung/Bebauung (DKKV und Universität Potsdam 2015)	Raumordnung/Regionalplanung (Länderebene); Bauleitplanung (kommunale Ebene)	Win-win, da gleichzeitig Hochwasserrisiken effektiv reduziert und Umweltschutzziele verfolgt werden können (DKKV und Universität Potsdam 2015) (Albrecht et al. 2018); andererseits stehen dem Nutzen aus wirtschaftlicher Perspektive Kosten – in Form der Nicht-ausschöpfung wirtschaftlichen Potenzials – gegenüber (Bau-land).
Neuartige Nutzungskonzepte von Gebäuden/im Gebäudeinneren, bspw. für eine Nutzung kritische Bereiche nur in oberen Geschossen (NBS 2014)	Technologie und natürliche Ressourcen	Verlagerung besonders sensibler Gebäudeausstattung	Bausektor; Unternehmen; Gebäudeeigentümer und -eigentümerinnen	Von jeweiliger Gebäudenutzung abhängig; Anwendung sehr individuell.

⁶ Siehe auch: <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/faqs/DE/themen/heimat/hochwasserschutz/hochwasserschutz-faqs.html>

⁷ 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 ⁷	Charakteristika
Ausbau von Hochwasserschutzdeichen; Errichtung permanenter oder Verwendung mobiler Hochwasserschutzwände (DKKV und Universität Potsdam 2015; Albrecht et al. 2018)	Technologie und natürliche Ressourcen	Reduzierung des Überschwemmungsrisikos	Bundesländer	Low-regret
Verknüpfung von Frühwarnsystemen mit Notfallplänen (DKKV und Universität Potsdam 2015; Kreibich et al. 2016; Albrecht et al. 2018)	Technologie und natürliche Ressourcen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Umfassendes Risiko- und Schadensmanagement	Kommunen	Genauigkeit der Vorhersagen ist weiter zu erhöhen.
Verpflichtende Erstellung von Naturgefahrengutachten beim Bau	Rechtliche Rahmenbedingung und politische Strategien; Akzeptanz und Motivation	Risikotransparenz, Stärkung des Risikobewusstseins	Gesetzliche Verankerung: Bund/Bundesländer; Umsetzung: Baubehörden; Hauseigentümer und -eigentümerinnen	Möglicherweise relevant für Versicherbarkeit von Gebäuden; Anwendung auf Bestandsgebäude fraglich.

Unter den skizzierten weiterreichenden Anpassungsmöglichkeiten stechen regulative und technologische Optionen heraus. Ein wichtiger Hebel wären allerdings zusätzlich finanzielle Ressourcen, zum Beispiel für technische Lösungen. Fördermaßnahmen wie die 2020 reformierte Städtebauförderung des Bundes können entscheidend dazu beitragen, die Anwendung erforderlicher Maßnahmen stärker zu verbreiten.

Im Rahmen weiterreichender Anpassung bietet sich außerdem die Ausgestaltung von Aus- und Weiterbildungsangeboten für Akteure im Bausektor (Fachplaner, Architekten, Handwerker) an, um nachhaltiges Handeln zu fördern (Dosch et al. 2017). Solche Maßnahmen wirken sich positiv auf die Anpassungsdimensionen „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ wie auch „Motivation/Akzeptanz“ aus.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 6: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung "Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser"

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Anpassung von Bebauungs- und Gebäudekonzepten und Anpassung des Hochwasserrisikomanagements mittels Flächenausweisungen und Bebauungsplänen, beispielsweise: ○ klimawandelberücksichtigende Ausweisung von Überschwemmungsgebieten und Durchsetzung von Bauverböten in solchen Gebieten (Janssen et al. 2016; BBSR 2016b; Deutscher Städtetag 2019) ○ Rückgewinnung von Retentionsflächen

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
	○ Festlegungen zur Anlagenaufrüstung und Vermeidung toxikologischer Risiken in überschwemmungsgefährdeten Gebieten (Albrecht et al. 2018)
Finanzwirtschaft	- Abschluss von Versicherungen, z. B. Gebäude-/ Elementarschadensversicherungen (Albrecht et al. 2018; GDV 2019b): die Dichte abgeschlossener Elementarschadensversicherungen, die durch Hochwasser hervorgerufene Gebäudeschäden versichert, ist zwar über die letzten Jahre angestiegen, fällt im bundesweiten Gesamtvergleich aber eher gering aus (GDV 2019b; UBA 2019b). - Die Versicherungswirtschaft besitzt einen starken Hebel, um auf die Einhaltung von Standards hinzuwirken, z. B. indem die Versicherbarkeit an die Einhaltung bestimmter Standards beim Bau selbst (Bauweise, Bauprodukte, Nutzung, Größe etc.) und/oder bei der Bauvorbereitung/-planung (z. B. Erstellung von Naturgefahren-gutachten beim Bau) geknüpft ist. Mit der Festschreibung gesetzlicher Regeln geht auch Planungssicherheit einher, welche sich positiv auf Versicherungskonditionen für Gebäude gegenüber Elementarschäden auswirken würde.
Bevölkerungs- und Katastrophen-schutz	Unterstützung im Katastrophenfall; Risikoaufklärung

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk schätzte als zeitlichen Rahmen für Anpassungsprozesse bezogen auf die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ mehrere Jahrzehnte (unter 50 Jahre), da unter anderem raumplanerische Prozesse hierbei eine wichtige Rolle spielen.

Tabelle 7: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung "Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser"

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Einsatz Hochwasserschäden-mindernder Bauteilaufbauten und Materialien oder Technologien zur Neuerrichtung oder zum Umbau von Gebäuden - Abschluss von Versicherungen - Festlegung und verpflichtende Umsetzung technischer Standards (bauliche Auflagen, zusätzliche hochwasserberücksichtigende Regularien) - Informationsbereitstellung, Wissensvermittlung, Anregung der Motivation zum (anpassungsrelevanten) Handeln - Erwerb, Vorhalten, Einsatz mobiler Hochwasserschutzwände - Planung und Errichtung hochwassersicherer/-angepasster Gebäude
10-50 Jahre	- Wasserbauliche Maßnahmen - Deichbau, Errichtung von Hochwasserrückhaltebecken - Auenanschluss, Überflutungsflächen - Anlage und Steuerung von Poldern

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Ansatzpunkte sind hier insbesondere neu zu errichtende/nach nicht bestehende Gebäude. Flusshochwassergefährdete Gebiete vollständig von Neubauten freizuhalten, also die Neuerrichtung von Gebäuden in solchen Gebieten zu vermeiden, wäre dabei eine Option. Der Rückbau solcher Flächen, also die (partielle) Rücknahme von Siedlungsbereichen würde hingegen einen enormen

– nicht nur finanziellen – Aufwand bedeuten (Janssen et al. 2016; Albrecht et al. 2018). Der Ansatz käme aber grundsätzlich zur Hochwasservorsorge in Betracht (Greiving et al. 2018; Weingraber und Schindelegger 2018; Weingraber und Schindelegger 2018) und ließe sich über Festlegungen in den Raumordnungsplänen (der Länder), mittels Siedlungsentwicklung, welche auch Rückbau involvieren kann, und in der Bauleitplanung, über die Rücknahme von Flächenausweisungsrechten durch Planänderungs- oder Aufhebungsverfahren, vornehmen, wenngleich der geordnete Siedlungsrückzug (bislang) keine explizite Erwähnung im Raumordnungsgesetz und Baugesetzbuch (und auch nicht im Wasserhaushaltsgesetz) findet (Janssen et al. 2016; Greiving et al. 2018). Die sinnvolle Anwendung gesetzlicher Grundlagen ist bisher fraglich. Bei der Durchsetzung über Enteignungen stellt sich beispielsweise die Frage nach der Angemessenheit, da weniger einschneidende Mittel zum Einsatz kommen können, also „gewöhnliche“, bekannte Hochwasserrisikomanagement-Maßnahmen. Zwar könnten solche unter Umständen sogar einen höheren finanziellen Aufwand bedeuten, allerdings zögen die im Falle von Enteignungen (also Eingriffe in das Eigentum) anfallenden Entschädigungen ebenfalls einen zusätzlichen Einsatz finanzieller Ressourcen nach sich (Greiving et al. 2018).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 8: „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“: Wirksamkeit der Anpassung

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

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die 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 in nachstehender Tabelle ersichtlich, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Finanzielle Ressourcen“ sowie „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 9: „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“: 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	1-2	2	4	3	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.

2.2.2 Vegetation in Siedlungen

Hintergrund und Stand der Forschung

Unter Vegetation in Siedlungen werden im Folgenden „alle Formen grüner Freiräume und begrünter Gebäude“ (Dosch et al. 2017; S. 50) in und in unmittelbarer Nähe von Siedlungsflächen verstanden. Dazu gehören „Parkanlagen, Friedhöfe, Kleingärten, Brachflächen, Spielbereiche und Spielplätze, Sportflächen, Straßengrün und Straßenbäume, Siedlungsgrün, Grünflächen an öffentlichen Gebäuden, Naturschutzflächen, Wald und weitere Freiräume“ (Dosch et al. 2017; S. 50) mit Vegetation. Des Weiteren zählen private Gärten, landwirtschaftliche Flächen, Fassaden-, Dach- und Innenraumbegrünung „sowie Pflanzen an und auf Infrastruktureinrichtungen zur Siedlungsvegetation“ (Dosch et al. 2017; S. 50). Die Vegetation in Siedlungen spielt eine zentrale Rolle für eine klimagerechte und -angepasste Siedlungsentwicklung (Bundesregierung 2008; Bundesregierung 2015; Dosch et al. 2017; Straff und Mücke 2017).

Wichtige Funktionen von Siedlungsvegetation sind, neben zentralen Erholungsfunktionen, die Biotopvernetzung (Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“), die Reduktion von Hitze-, Ultraviolettstrahlungs-, Luft-⁸ und Lärmbelastung (Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“) sowie die Abflussminderung (Handlungsfelder „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Bauwesen“). Der Erhalt historischen Stadtgrüns ist zudem von kultureller und touristischer Bedeutung (Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“). Darüber hinaus erfüllt Siedlungsvegetation durch die Bindung von Kohlenstoff sowie die Reduzierung des Kühlenergiebedarfs (Handlungsfeld „Energiewirtschaft“) Klimaschutzfunktionen (Dosch et al. 2017; Moser et al. 2017).

Aufgrund ihrer wichtigen stadtklimatischen Funktionen zur Reduktion von Hitzebelastung steht die Vegetation in Siedlungen in der Wirkungskette vor der Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“. Durch ihre kühlende Wirkung kann Vegetation den städtischen Wärmeinseleffekt erheblich mindern (Gill et al. 2007; Susca et al. 2011). Die Kühlungswirkung von Siedlungsvegetation kommt durch unterschiedliche Faktoren zustande, wobei die Kombination verschiedener Vegetationsarten wichtig ist (Baumüller und Ahmadi 2016). Vegetation speichert im Gegensatz zu Gebäuden und versiegelten Flächen kaum Wärme und insbesondere Rasenflächen kühlen Nachts schneller ab (Stadt Nürnberg 2014). Hinzu kommt eine Kühlung durch Evapotranspiration (Sieker et al. 2019). Grünräume können so zur Kaltluftversorgung von Siedlungen beitragen, insbesondere wenn auf die Freihaltung von Kaltluftschneisen geachtet wird (GEO-NET 2011). Von besonderer Bedeutung für die Reduktion von Hitzebelastung am Tag ist, neben der Durchfeuchtung der Vegetation, der Schattenwurf von Bäumen (Bruse 2003; Ketterer und Matzarakis 2015; Endlicher 2018).

Die Vegetation in Siedlungen leistet nicht nur wertvolle Beiträge zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung, sie ist auch direkt durch den Klimawandel betroffen. Durch die Verschiebung von Arealen können sich Wachstumsbedingungen von Pflanzen langfristig verändern (siehe Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). Neue Schädlinge und Krankheiten, Trockenheit, Hitze, Überschwemmungen, Stürme sowie erhöhte Ozonwerte können zu gravierenden Schäden der Siedlungsvegetation führen (Mathey et al. 2011; Bergmann et al. 2015; Kühn und Gillner 2017). Während die Vulnerabilität gegenüber Niedrigtemperaturen im Winter eher abnimmt, kann die

⁸ Einige Baumarten können durch die Emission biogener Vorläufersubstanzen (zum Beispiel Terpene, sogenannte biogene volatile organische Substanzen) Ozon-Konzentrationen erhöhen (Fitzky et al. 2019; Wagner und Kuttler 2014). Die Abbauraten von Ozon sowie die Emissionen biogener Substanzen hängen sowohl von der Baumart als auch von deren physiologischem Zustand ab.

Gefahr für Spätfrostschäden im Vorfrühling steigen, da milde Temperaturen im Winter die Frosttoleranz beeinträchtigen und zu einem verfrühten Austrieb führen (Kühn und Gillner 2017). Mit dem Klimawandel können jedoch aufgrund des Temperaturanstiegs, der Verlängerung der Vegetationsperioden und erhöhter Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen auch wachstumsfördernde Wirkungen einhergehen.⁹ So zeigten beispielsweise Baumringanalysen unabhängig von der Klimazone einen Anstieg des Wachstums von Stadtbäumen in den letzten 100 Jahren. Gleichzeitig hat sich allerdings ihre Lebensdauer verkürzt (Moser et al. 2017).

Die Sensitivität von Siedlungsvegetation hängt stark von der Vegetationsart, der Artenzusammensetzung sowie von Standortbedingungen ab. Vegetationsarten unterscheiden sich in ihren Wachstumszeiten und ihrer Schadensanfälligkeit bei Extremwetter. So nimmt Rasen beispielsweise schneller Schaden durch Trockenheit als Bäume oder Ruderalvegetation (Mathey et al. 2011). Die Artenzusammensetzung bestimmt unter anderem den Wasserbedarf, die Winterhärte sowie die Anfälligkeit gegenüber Schädlingen und Krankheiten. Eine Veränderung der Artenzusammensetzung entsprechend neu entstehender Klimaverhältnisse ist insbesondere dann eine Herausforderung, wenn es sich um langsam wachsende Arten handelt (zum Beispiel Bäume) oder der Erhalt bestimmter Vegetationsbestände von historischer Bedeutung ist (Kühn et al. 2017b; Kühn et al. 2017a). Circa 70 Prozent der Straßenbäume in Deutschland entfallen auf lediglich sechs Arten, welche alle bereits jetzt multiplen Belastungen wie abiotischen Stressfaktoren, Krankheiten und Schädlingen ausgesetzt sind (Schönfeld 2019). Ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber sich ändernden, potenziell extremeren klimatischen Einflüssen ist dementsprechend eingeschränkt. Trocken- und Hitzestress setzen häufig verwendete Baumarten wie Linde und Ahorn zunehmend unter Druck und machen sie noch anfälliger gegenüber Schädlingen und Krankheiten. Einige der klassischen Stadtbäume werden zukünftigen Anforderungen daher nicht mehr gewachsen sein (LWG 2018).

Die Standortbedingungen für Siedlungsvegetation sind oft erschwert. Insbesondere Bäume sind daher den Konsequenzen des Klimawandels besonders ausgesetzt (Mathey et al. 2011). Stressoren für Stadtbäume sind unter anderem ein kleiner Wurzelraum aufgrund von Bodenverdichtung und -versiegelung, eine geringe Boden- und Luftqualität sowie Schadstoffeinträge wie Streusalz und Hundeurin (Moser et al. 2017). Für die Hitze- und Trockenheitstoleranz von Stadtbäumen sind insbesondere Größe und Wasserspeicherfähigkeit des Wurzelraums entscheidend. Des Weiteren ist die Vegetation in Städten, zumindest in bebauten Bereichen, überwiegend vom Grundwasser abgekoppelt und damit auf Niederschlag oder Bewässerung angewiesen (Dickhaut und Eschenbach 2018). In einigen Städten kann zudem Staunässe zu Problemen führen, insbesondere bei verdichteten, lehmig-tonigen Böden.

Pflanzen können sich in einem bestimmten Rahmen physiologisch an veränderte klimatische Bedingungen anpassen, zum Beispiel „durch Wurzelbildung, Blattabwurf oder Neubildung kleinerer, dickerer Blätter“ (Mathey et al. 2011, S. 32). Eine kurzfristige Anpassung von Pflanzen an Trockenstress ist der Verschluss der Stomata (Spaltöffnungen). Dies führt zu einer Einstellung der Evapotranspiration und erhöht die Vulnerabilität der Vegetation gegenüber Hitze. Zudem werden durch ein Absenken der Verdunstungsleistung die damit verbundenen Abkühlungseffekte von Vegetation beeinträchtigt (Mathey et al. 2011). Somit hat der Faktor Trockenheit bereits negative Auswirkungen auf die stadtklimatische Funktion der Siedlungsvegetation, bevor diese selbst sichtbar beschädigt wird. Reicht ein Verschluss der Stomata nicht aus und kann kein

⁹ Erhöhte Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen führen zu einer Veränderung der Stoffwechselprozesse in Pflanzen. Neben wachstumsfördernden Wirkungen gehört dazu auch eine Verringerung der Evapotranspiration von Blättern und Baumkronen (Leakey et al. 2009).

weiteres Wasser aus dem Boden verfügbar gemacht werden, kommt es zu sichtbaren Trockenstresssymptomen (zum Beispiel Welkerscheinungen). Bei anhaltendem Trockenstress erfolgt ein (teilweiser) Abwurf von Blättern oder Zweigen (Zweigabsprünge bei Eichen, Pappeln und Weiden). Diese sichtbaren Schäden wirken sich neben der Absenkung der Verdunstungsleistung auch negativ auf den Schattenwurf von Vegetation aus (Roloff et al. 2010).

Eine Methodik zur flächendeckenden Erfassung der Grünausstattung aller deutschen Städte mittels Satellitendaten (Sentinel-2) wird derzeit unter der Federführung des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) erarbeitet und soll zukünftig ein bundesweites Monitoring von Stadtgrün ermöglichen (BBSR 2019). Flächendeckende und vergleichbare Daten zur Grünausstattung könnten genutzt werden, um Handlungserfordernisse im Bereich Klimaanpassung aufzuzeigen und Anpassungsmaßnahmen zu planen. Außerdem könnte die Untersuchung der Auswirkungen der Novellierung des Baugesetzbuchs (2011/2013) in Bezug auf Klimaschutz und Klimaanpassung neue Erkenntnisse zur Einschätzung und Entwicklung von Planungsinstrumenten für Siedlungsvegetation generieren.

Grundlage der Operationalisierung

Der klimatische Einfluss „Trockenheit“ wird über die Indikatoren „Maximale Trockenperiode (CDD_[1]) im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober)“ (Abbildung 2) und „Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April bis September)“ (Abbildung 3) operationalisiert. Zusätzlich wird der Faktor „Hitze“ über den Indikator „Anzahl heißer Tage im Sommer (Juni bis August)“ abgebildet (Abbildung 4). Als Information zur räumlichen Exposition wird der Faktor „Vorkommen von Siedlungsflächen“ für das Jahr 2015 dargestellt (Abbildung 5). Dieser basiert auf den Landnutzungsklassen „Flächen städtischer Prägung“ und „Städtische Grün- und Erholungsflächen“ der Siedlungsflächenprojektionen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Behmer 2019).

Tabelle 10: Übersicht der Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Trockenheit	Maximale Trockenperiode (CDD _[1]) im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai-Oktober)	BAU-KL-01
Trockenheit	Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April-September)	BAU-KL-02
Hitze	Anzahl Heiße Tage im Sommer (Juni-August)	BAU-KL-03
Vorkommen von Siedlungsflächen	Siedlungsflächen	BAU-SO-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 längsten Trockenperioden traten in der Bezugsperiode im hydrologischen Sommerhalbjahr mit vereinzelt Dauern über 74 Tagen im Nordosten Schleswig-Holsteins (bei Plön) sowie mit Dauern von 57 bis 74 Tagen in Teilen von Berlin, Brandenburg (bei Eberswalde, Ludwigsfelde und Rheinsberg), Sachsen-Anhalt (bei Magdeburg) und Mecklenburg-Vorpommern (Vorpommersche Boddenlandschaft) auf (Abbildung 2). In allen Bundesländern außer Hamburg und Bremen waren zudem mittellange Trockenperioden von 40 bis 57 Tagen zu beobachten, insbesondere im Nordosten Mecklenburg-Vorpommerns, in Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Hessen, Rheinland-Pfalz und im Saarland. Auch der nordwestliche Rhein-Main-Agglomerationsraum mit Großstädten wie Frankfurt, Wiesbaden und Mainz war davon betroffen. Die klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode war bis auf den Alpenraum und einige Mittelgebirgsgebiete bundesweit negativ (Abbildung 3). Besonders negative Wasserbilanzen (-400 bis -590 Millimeter) traten in Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Bayern auf. Bei Magdeburg fielen lange Trockenperioden mit Minimalwerten der Klimatischen Wasserbilanz zusammen. Die Anzahl der heißen Tage im Sommer lag in der Bezugsperiode fast flächendeckend bei null bis zehn Tagen, nur im oberrheinischen Tiefland und im Neckartal bei Heilbronn traten mehr Heiße Tage auf (10 bis 20) (Abbildung 4).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

In der Bandbreite des RCP8.5-Modellensembles kann Trockenheit in den meisten Regionen Deutschlands zur Mitte des Jahrhunderts sowohl zu- als auch abnehmen. Im optimistischen Fall zeigt sich sowohl eine flächendeckende Abnahme der maximalen Trockenperiode im hydrologischen Sommerhalbjahr (15. Perzentil) (Abbildung 2) als auch eine Erhöhung der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (85. Perzentil) (Abbildung 3). In diesem Fall kann es in fast allen Teilen Deutschlands feuchter werden (um bis zu 110 Millimeter mehr in der Klimatischen Wasserbilanz von April bis September) und die Länge der maximalen Trockenperioden zwischen Mai und Oktober kann abnehmen (in den meisten Gebieten zwischen -1 und -10 Tage, teilweise bis zu -20 Tage).

In ähnlichem Ausmaß kann die Trockenheit im pessimistischen Fall zunehmen. So weisen die Projektionen für die klimatische Wasserbilanz im 15. Perzentil flächendeckend Abnahmen aus. In den meisten Regionen liegen diese bei -10 bis -100 Millimeter, teilweise jedoch bei bis zu -200 Millimeter. Auch Teile des Rhein-Ruhr-Agglomerationsraums könnten davon betroffen sein. In den Alpen können die Abnahmen sogar noch höher ausfallen. Die maximale Trockenperiode verlängert sich im pessimistischen Fall (85. Perzentil) ebenfalls bundesweit. Die meisten Zunahmen liegen dabei zwischen zehn und 20 Tagen, in vielen Regionen jedoch auch darunter (zum Beispiel im bayerischen Alpenvorland). Ein Schwerpunkt stärker zunehmender Trockenperioden wird in Rheinland-Pfalz projiziert.

Die Anzahl der heißen Tage im Sommer wird zur Mitte des Jahrhunderts flächendeckend zunehmen (Abbildung 4). Im optimistischen Fall (15. Perzentil) werden durch Zunahmen von null bis acht Tagen deutlich mehr Regionen von einer Anzahl heißer Tage betroffen sein, die in der Bezugsperiode nur im oberrheinischen Tiefland auftrat (zehn bis 20 Tage). An der Grenze zu Frankreich werden die Temperaturen in einem stärkeren Ausmaß zunehmen, wodurch dort in einzelnen Orten 20 bis 30 heiße Tage projiziert werden. Im pessimistischen Fall kann es noch deutlich häufiger zu Hitze kommen. Im 85. Perzentil werden in weiten Teilen Deutschlands zehn bis 20 heiße Tage erwartet.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

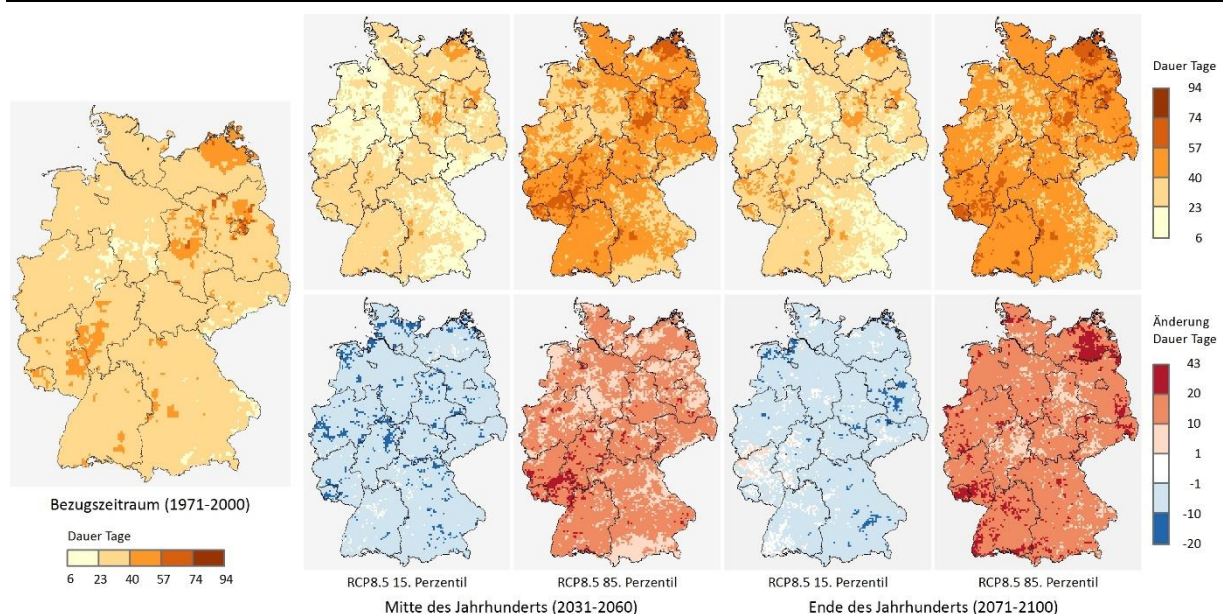
Wie bereits Mitte des Jahrhunderts kann auch Ende des Jahrhunderts die Trockenheit in den meisten Regionen Deutschlands sowohl zu- als auch abnehmen. Im optimistischen Fall (15.

Perzentil) zeigen die Projektionen allerdings in weniger Regionen eine Verkürzung der maximalen Trockenperiode als Mitte des Jahrhunderts (Abbildung 2). Insbesondere im Westen Deutschlands werden auch Verlängerungen erwartet. Auch für die klimatische Wasserbilanz wird im 85. Perzentil keine flächendeckende Zunahme mehr projiziert (Abbildung 3). Ende des Jahrhunderts werden für fast ganz Rheinland-Pfalz und das Saarland sowie große Teile von Baden-Württemberg, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Thüringen und die nördliche Hälfte Bayerns Abnahmen der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode erwartet. In einigen Gebieten im Westen Deutschlands, beispielsweise in der Grenzregion zwischen Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen, ist damit selbst im optimistischen Fall von zunehmender Trockenheit auszugehen, da sich sowohl die maximale Trockenperiode verlängert als auch die klimatische Wasserbilanz abnimmt.

Im pessimistischen Fall nimmt die klimatische Wasserbilanz bundesweit ab und dies deutlich stärker als Mitte des Jahrhunderts, wodurch in vielen Regionen eine klimatische Wasserbilanz von -400 bis -590 Millimeter projiziert wird. Die stärksten Abnahmen werden dabei im Süden Deutschlands erwartet, wodurch auch die Verdichtungsräume München und Stuttgart besonders von zusätzlicher Trockenheit betroffen sein könnten. Die maximale Trockenperiode verlängert sich im pessimistischen Fall (85. Perzentil) ebenfalls flächendeckend. In deutlich mehr Gebieten als Mitte des Jahrhunderts liegt die Zunahme bei über 10 Tagen, Schwerpunkte werden unter anderem in Mecklenburg-Vorpommern und dem Saarland projiziert.

Die Anzahl der heißen Tage im Sommer wird zum Ende des Jahrhunderts bundesweit weiter zunehmen (Abbildung 4). Im oberrheinischen Tiefland zeigen die Projektionen dabei weiterhin einen Hotspot mit 30 bis 40 heißen Tagen im optimistischen und 40 bis 48 heißen Tagen im pessimistischen Fall. In vielen weiteren Regionen wird ebenfalls eine hohe Anzahl zusätzlicher heißer Tage projiziert, die geringsten Zunahmen werden in Norddeutschland erwartet (insbesondere an der Küste).

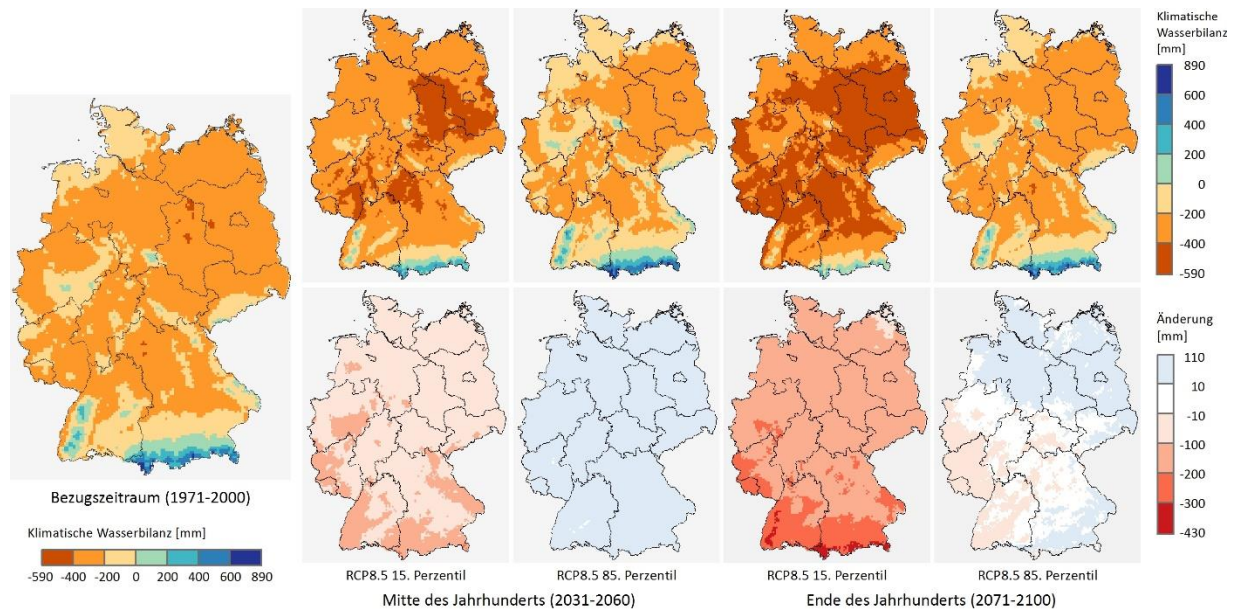
Abbildung 2: Maximale Trockenperiode (CDD_[1]) im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober)



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

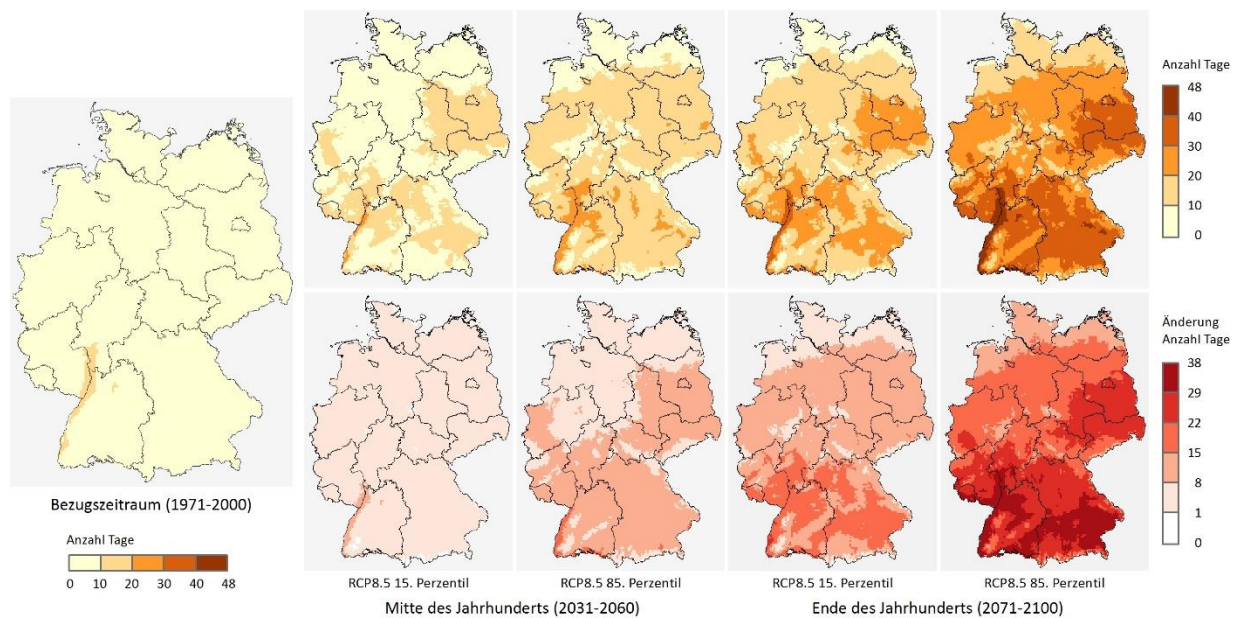
Hinweis (Abbildungen 2, 3, 4): Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich hier und in den folgenden Abbildungen jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Abbildung 3: Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (April-September)



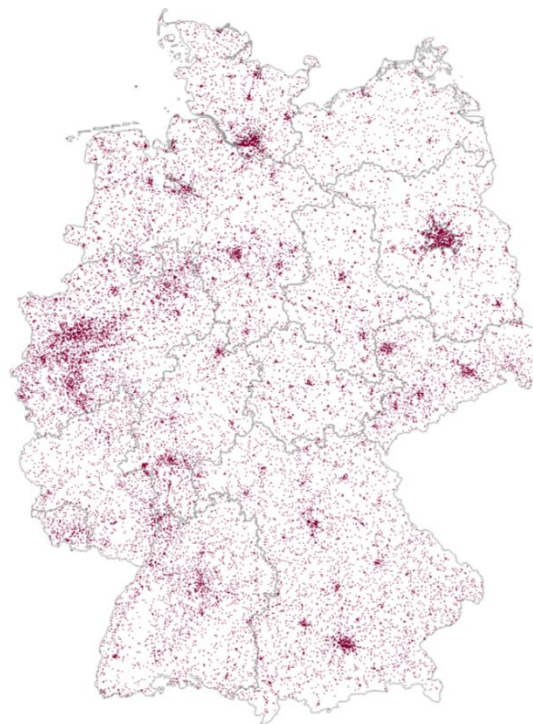
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 4: Anzahl heißer Tage im Sommer (Juni-August)



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 5: Siedlungsflächen



Ausgangskarte 2015

Datengrundlage: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 11: „Vegetation in Siedlungen“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Kernaussagen zu „Vegetation in Siedlungen“

- ▶ Die Vegetation in Siedlungen wird im Zusammenhang mit dem Klimawandel voraussichtlich zusätzlichen Belastungen ausgesetzt sein.
- ▶ Insbesondere multiple Belastungen durch Trockenheit, Hitze, Schädlinge, Krankheiten sowie Stürme werden die Siedlungsvegetation voraussichtlich weiter und zunehmend unter Druck setzen.
- ▶ Trockenheit kann in den meisten Regionen Deutschlands bis Mitte und Ende des Jahrhunderts sowohl zu- als auch abnehmen, während für Hitze im Laufe des Jahrhunderts flächendeckend Zunahmen erwartet werden.
- ▶ Für das Ende des Jahrhunderts werden für fast ganz Rheinland-Pfalz und das Saarland sowie große Teile von Baden-Württemberg, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Thüringen und die nördliche Hälfte Bayerns Abnahmen der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode projiziert, während in anderen Regionen im optimistischen Fall auch von Zunahmen ausgegangen wird.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“

Zu den Sensitivitätsfaktoren zählen die Vegetationsart, denn unterschiedliche Wachstumszeiten und Wurzel Ausbildung bedingen unterschiedliche Schadensanfälligkeiten gegenüber Extremwetter (zum Beispiel ist Rasen schadanfälliger gegenüber Hitze und Trockenheit im Vergleich zu Bäumen), und die Artenzusammensetzung, welche unter anderem den Wasserbedarf, die Winterhärte und die Schädlings- und Krankheitsanfälligkeit beeinflusst. Die räumliche Exposition bestimmende Faktoren umfassen die Luftqualität, Schadstoffeinträge wie Streusalz sowie die Versiegelung und der Grad der Bodenverdichtung, der die Größe und Wasserspeicherfähigkeit des Wurzelraums beeinflusst.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Die Anpassung von Vegetation an veränderte Umweltbedingungen geht oft mit Zuwachsverlusten einher. Wird die Grenze der ökologischen Anpassungsfähigkeit überschritten, beispielsweise durch zu starken oder langanhaltenden Trockenstress, entstehen sichtbare Schäden bis hin zum Absterben (Mathey et al. 2011). Hitze- und Trockenheitstoleranz ist bei der Neupflanzung daher ein wichtiges Kriterium (Straff und Mücke 2017). Trockenheitstolerantere Arten zeichnen sich meist durch eine von vornherein geringere Evapotranspiration aus. Die so entstehenden Defizite in der Kühlleistung können jedoch teilweise durch die Pflanzung dicht belaubter Spezies mit großem Schattenwurf kompensiert werden (Duthweiler et al. 2017). Eine Möglichkeit, Trockenstress zu vermeiden, ist die Bewässerung der Siedlungsvegetation (Sieker et al. 2019). Teilweise bestehen auf kommunaler Ebene bereits Bewässerungskonzepte, welche nicht mit Trinkwasserressourcen konkurrieren. So wird beispielsweise die Nutzung von Wasser aus Regenrückhaltebecken geprüft (Landeshauptstadt Hannover 2017). In München wird bereits Regenwasser von Geh- und Radwegen und teilweise von Straßen in Pflanzgruben geleitet (Dickhaut und Eschenbach 2018). Auch in Berlin soll Regenwasser künftig nicht nur abgeleitet, sondern teils auch zur Bewässerung genutzt werden (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2016).

Auch mithilfe der Städtebauförderung kann Siedlungsvegetation gezielt gestärkt werden, indem im Rahmen dadurch bereitgestellter finanzieller Mittel sowohl Maßnahmen zur Planung, Herstellung und Gestaltung von Stadtgrün als auch zur Entsiegelung umgesetzt werden (Dosch et al. 2017; VV Städtebauförderung 2020.). Zudem gilt die Verbesserung der grünen Infrastruktur, also beispielsweise des Stadtgrüns, als Klimaschutz- beziehungsweise klimaanpassungsrelevante Maßnahme, deren Berücksichtigung inzwischen zu den Fördervoraussetzungen gehören. Konkret zählen zu den dementsprechend förderfähigen Maßnahmen also die Schaffung oder Erweiterung von Grünflächen und Freiräumen, die Vernetzung von Grün- und Freiflächen, die Begrünung von Bauwerksflächen sowie die Erhöhung der Biodiversität. Weiterhin stehen im Rahmen des Bundesprogramms zur "Anpassung urbaner Räume an den Klimawandel" finanzielle Mittel zur Durchführung konzeptioneller und investiver Projekte zur Verfügung.¹⁰

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Anpassung an einen klimawandelbedingt zunehmenden Beeinträchtigung beziehungsweise zur Eindämmung einer solchen erhöhten Belastung und Schädigung von Siedlungsvegetation beitragen sollen:

¹⁰ Siehe auch: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/aufrufe/aktuelle-meldungen/anpassung-urbaner-raeume-an-klimawandel.html>

Tabelle 12: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung mit Bezug zur Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“ 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. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
2.20	Bundesprogramm zur Anpassung urbaner Räume an den Klimawandel	Finanzielle Ressourcen	Projektförderung zur klimaangepassten Stadtentwicklung durch gezielte Entwicklung und Modernisierung von Grünflächen im urbanen Raum.
2.25	Machbarkeitsstudie Dach- und Fassadenbegrünung	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Erstellung einer Machbarkeitsstudie als Grundlage für die Entwicklung einer Förderrichtlinie auf Bundesebene. Hierfür ist das Auswerten laufender Förderungen von Dach- und Fassadengrün Hauptziel des Projektes. Zudem soll als Grundlage für das Aufstellen eines möglichen Förderprogrammes der Stand des Wissens zusammengefasst werden, bspw. baupraktische Lösungen und ihr Beitrag zu Klimaschutz, Minderung der sommerlichen Temperaturen, Regenwassermanagement, biologische Vielfalt.
4.28	Planungswerkzeuge und Informationsmaterialien zu klimaresilienten und nicht-allergenen Stadtbäumen für Kommunen	Wissen	Informationen zu Eigenschaften verschiedener Baumarten und zu Standortfaktoren, die darauf hinweisen, wie Hitze-, UV- und Dürrestress verringert bzw. vermieden werden können (z. B. Belastung durch Streusalz minimieren, Baumreihen statt Einzelbäume etc. (BBSR 2016c)). Z. B. Hitze- und trockenstresstolerante Gehölze bevorzugen, vgl. Klima-Arten-Matrix des Instituts für Forstbotanik und Forstzoologie der TU Dresden ¹¹ (BBSR 2016a; BBSR 2016c).
6.6	Weiterentwicklung eines Leitbildes "Schwammstadt"	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	Ermöglichung eines nachhaltigeren Umgangs mit Niederschlagswasser, z. B. Nutzung für Grünflächenbewirtschaftung
6.7	Weiterentwicklung von Konzepten zur dezentralen Bewässerung von Stadtgrün und Ausarbeitung einer Musterempfehlung	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Trockenheitsvorsorge; Betrachtung verschiedener Wasserarten (z. B. Grundwasser, dezentral gespeichertes Regenwasser, Grauwasser); neben den Wassermengenfragen sind auch Aspekte der Wasserqualität zu berücksichtigen, um Belastungen für Umwelt und Gesundheit auszuschließen.
6.9	Fernerkundungsbasierte Erfassung und stadträumlich-funktionale Differenzierung der Grünausstattung von Städten in Deutschland	Wissen	Ziel ist die bundesweit flächendeckende Erfassung von Stadtgrün sowie Erarbeitung einer Typologie der stadträumlich-funktionalen differenzierten Grünausstattung von Städten in Deutschland. Darüber hinaus sollen räumlich-funktionale Bereiche mit Gründefiziten identifiziert werden, in denen der Bund seine Aktivitäten konzentriert, ggf. auch hinsichtlich Städtebaufördermitteln.

¹¹ Siehe auch: <https://citree.de/>

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
6.10	Grüne Infrastruktur in der nachverdichtenden Stadt	Motivation und Akzeptanz; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Unter dem Primat des forcierten Wohnungsneubaus soll der Fokus auf die Sicherung, Qualifizierung und Neuentwicklung von Grünflächen in verdichteten und verdichtenden Städten gelegt werden. Erarbeitet werden sollen Prinzipien einer qualitätsvollen Freiraumgestaltung im Rahmen einer doppelten Innenentwicklung (Nachverdichtung und Begrünung). [...] Ziel ist es, den Stellenwert von urbaner grüner Infrastruktur in Stadtplanungsprozessen im Planungsvollzug zu stärken und ein Leitbild für die Stadtgrüngestaltung in der nachverdichtenden Stadt zu erarbeiten.

Weiterreichende Anpassung

Generell kann die Erweiterung und Verbesserung der grünen Infrastruktur in Siedlungsgebieten nur geknüpft an die Qualifizierung und Veränderung der grauen Infrastruktur stattfinden (Gill et al. 2007). Als Grundvoraussetzung für widerstandsfähige Stadtvegetation ist zudem dem Boden- und Wurzelraum mehr Aufmerksamkeit zu schenken (auch im Zusammenhang mit Klimaanpassung), den für ihre Wasserversorgung und damit zum Erhalt ihrer Vitalität und Standsicherheit benötigen. Hinsichtlich der Artenzusammensetzung von Stadtbäumen besteht die Notwendigkeit der Diversifizierung. Für die großflächige Anwendung von Ansätzen zur Anpassung der Siedlungsvegetation an klimatische Veränderungen (insbesondere Hitze, Trockenheit, Schädlinge) wäre die Einführung von Standards förderlich, beispielsweise bezüglich Baumgrößen und Bodeneigenschaften wie Durchwurzelbarkeit und Wasseraufnahme- und Wasserspeicherkapazität (ZTV-Vegtra-Mü 2016). Ein weiterer Bestandteil von Anpassungsbemühungen könnte die Monetarisierung der Ökosystemleistungen sein, die Grünflächen- und Gehölzbestände erbringen. Die Sichtbarkeit dieser Leistungen und damit auch das Bewusstsein für deren Relevanz hinsichtlich der Anpassung an den Klimawandel ließe sich dadurch erhöhen (TEEB-DE 2018; Hirschfeld et al. 2019).

Tabelle 13: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ¹²	Charakteristika
Rückbau von Gebäuden und gebauter Infrastruktur und Nutzung von Brachflächen	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Motivation und Akzeptanz	Der Rückbau von Gebäuden und gebauter Infrastruktur kann Platz für Vegetationsinseln oder begrünte Belüftungskorridore schaffen und Brachflächen können für die Entwicklung städtischen Grüns genutzt werden	Regionalplanung; Bauleitplanung	Die Erweiterung und Verbesserung der grünen Infrastruktur in Siedlungsgebieten sind an die Qualifizierung und Veränderung der grauen Infrastruktur geknüpft (Gill et al. 2007).

¹² 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.

Schaffung von unterirdischem Raum für das Wurzelwachstum und als Wasserspeicher von Stadtbäumen	Technologie und natürliche Ressourcen	Mehr unterirdischer Raum für Stadtbäume erhöht deren Vitalität und Standsicherheit, beispielsweise durch die Schaffung leitungs-freier Wurzelkorridore, was durch eine gebündelte Verlegung des Leitungsbestands und die räumliche Trennung zwischen Leitungsbereich und Wurzelraum erzielt werden könnte	Kommunen (Bauleitplanung); Unternehmen	Da hierfür ein hoher Koordinierungsaufwand zu erwarten ist, erscheinen solche Veränderungen eher im Zusammenhang mit Leitungssanierungen oder -erneuerungen wahrscheinlich.
Diversifizierung der Artenzusammensetzung von Stadtbäumen	Technologie und natürliche Ressourcen	Minderung des Schadensrisikos, das durch den potenziellen Totalausfall einer oder mehrerer vielfach eingesetzter Arten gegeben ist	Kommunen; Fachplanung	Der bisherige Kenntnisstand zu zukünftigen Schädlingsarten und der Befallintensität weist noch erhebliche Lücken auf. Deshalb sollten die Schadensrisiken zumindest mithilfe eines breiteren Artenspektrums gestreut werden. Bisherige Testergebnisse können Anhaltspunkte für die Artenauswahl liefern (GALK Stadtbäume 2009; Wrede 2016; Fellhölter et al. 2018; LWG 2018; Schönfeld 2018; TUM 2019).
Einführung von Standards, beispielsweise bezüglich Baumgrößen und Bodeneigenschaften wie Durchwurzelbarkeit und Wasseraufnahme- und Wasserspeicherkapazität (ZTV-Vegtra-Mü 2016)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Anpassung der Siedlungsvegetation an klimatische Veränderungen (insbesondere Hitze, Trockenheit, Schädlinge)	Bauleitplanung; Fachplanungen	Standards könnten an den Grünflächenfaktor oder den Biotopflächenfaktor angelehnt sein, welche bei der Aufstellung von Bebauungsplänen bereits festgesetzt werden können (Stadt Jena 2016; Dosch et al. 2017; Mattanovich et al. 2017; Lienhoop und Schröter-Schlaack 2018).
Analyse der Ökosystemleistungen der Grünflächen- und Gehölzbestände	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Erhöhung der Sichtbarkeit von Ökosystemleistungen, die unter anderem von städtischem Grün erbracht werden, für die breite Öffentlichkeit und für Entscheidungsträger	Forschung; Naturschutzverbände; Kommunen	Die Erhöhung der Sichtbarkeit von Ökosystemdienstleistungen könnte durch (indexbasierte) Monetarisierung erfolgen (TEEB-DE 2018; Hirschfeld et al. 2019).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Im Zusammenhang mit der Stärkung der Siedlungsvegetation kann insbesondere die Bauleitplanung wichtige Beiträge leisten, da sie grundsätzlich darauf abzielt, Flächen mit positiven Effek-

ten für das Stadtklima zu sichern und darunter auch Grünflächen fallen (Baumüller 2018; Ahlhelm et al. 2020). Insbesondere die beiden Novellen des Baugesetzbuches in den Jahren 2011 und 2013 gaben diesbezüglich wichtige Impulse. Zu den relevanten Festlegungsmöglichkeiten auf beiden Ebenen der Bauleitplanung (also Flächennutzungsplanung und Bebauungsplanung) gehören die Gebäudebegrünung, die Freiraumentwicklung im Siedlungsraum sowie die Konkretisierung und planerische Ausgestaltung der „Doppelten Innenentwicklung“, beispielsweise mittels Baumpflanzung, Dach- und Fassadenbegrünung (Adrian et al. 2018). Weiterhin sind Mindestanteile für Vegetations- und Grünelemente anhand des Biotopflächenfaktors und des Grünflächenfaktors in der Planung zu berücksichtigen.

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ wurde der Zeitrahmen, den die Anpassung der Siedlungsvegetation erfordert auf mehrere Jahrzehnte, teilweise über 50 Jahre, eingeschätzt.

Tabelle 14: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Etablierung eines Grünflächen- und Baumkatasters (für Stadtgrün) - Entwicklung und Einführung eines Systems zur Monetarisierung von (unter anderem durch städtisches Grün erbrachte) Ökosystemleistungen
10-50 Jahre	- Erweiterung des für Pflanzen(wurzeln) verfügbaren unterirdischen Raums - Diversifizierung der Artenzusammensetzung - Umsetzung des Leitbilds „Schwammstadt“
> 50 Jahre	- Umsetzung eines zu erarbeitenden Leitbilds für die Stadtgrüngestaltung in der nachverdichteten Stadt

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 15: „Vegetation in Siedlungen“: Wirksamkeit der Anpassung

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

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

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

Tabelle 16: „Vegetation in Siedlungen“: 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	3-4	3-4	3-4	2-4	3-4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

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

2.2.3 Stadtklima/Wärmeinseln

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Stadtklima wird das durch dichte Bebauung und Emissionen modifizierte Lokalklima städtischer Gebiete bezeichnet (Landsberg 1981; WMO 1996). Kennzeichnend für das Stadtklima ist die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel. Als städtische Wärmeinsel werden geschlossene Isothermen bezeichnet, welche die Stadt vom allgemeinen Temperaturfeld trennen. Die Stärke des städtischen Wärmeinseleffekts wird dabei als positive Lufttemperaturdifferenz zwischen wärmeren städtischen Gebieten und dem kühleren Umland angegeben. Entscheidend für die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel ist die modifizierte Strahlungs- und Energiebilanz in Städten. Die Verwendung von Baumaterialien mit niedriger Albedo, die vergrößerte Oberfläche durch vertikale Gebäudestrukturen, Mehrfachreflexionen an Gebäudewänden sowie bestimmte Luftschadstoffe verstärken die Strahlungsabsorption (Oke 2011; Mohajerani et al. 2017). Hinzu kommen anthropogene Wärmeemissionen, beispielsweise durch Verkehr und Gebäudeklimatisierung. Die Geometrie der urbanen Bebauung beeinflusst wiederum die Windzirkulation in Städten und damit den Abtransport von Wärme. Zudem ist die Verdunstungskühlung aufgrund von Flächenversiegelung und vergleichsweise geringer Vegetationsbedeckung in Städten deutlich herabgesetzt (Peng et al. 2012; Sieker et al. 2019). Die Wärmeabstrahlung der Baukörper ist aufgrund der erhöhten Wärmespeicherkapazität der Baumaterialien im Vergleich zum Umland deutlich verlangsamt, weshalb der städtische Wärmeinseleffekt in der Nacht am stärksten ist (Kuttler 1997). In Deutschland kann die städtische Wärmeinselintensität unterschiedlich hoch ausfallen. Beispielsweise wurden für Stuttgart im Zeitraum zwischen 2000 und 2011 kurzzeitig Maximalwerte von bis zu 12 Kelvin Lufttemperaturunterschied gemessen (Ketterer und Matzarakis 2014). In Köln ergaben Messungen zwischen 2010 und 2012 eine maximale Wärmeinselintensität von über zehn Kelvin (Grothues et al. 2013).

Städtische Wärmeinseln können zu einer deutlich erhöhten Wärmebelastung führen (Heaviside et al. 2017) (siehe „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Wird als Index für die Wärmebelastung die physiologisch äquivalente Temperatur betrachtet, kann der städtische Wärmeinseleffekt sogar noch höher ausfallen als bei einer reinen Betrachtung der Lufttemperatur (Ketterer und Matzarakis 2014). Zudem kann der städtische Wärmeinseleffekt die negativen Auswirkungen von Luftschadstoffen, insbesondere von bodennahem Ozon, verstärken (Swamy et al. 2017).

Die Intensität der städtischen Wärmeinsel wird von verschiedenen stadtstrukturellen Faktoren beeinflusst. Zum einen trägt die urbane Flächenversiegelung zur Erhöhung der lokalen Oberflächentemperaturen bei. Beispielsweise zeigte eine Studie in Berlin, dass die Oberflächentemperatur pro zehn Prozent Versiegelungsgrad um 0,1 Kelvin am Morgen und um bis zu 0,8 Kelvin bei maximaler Einstrahlung steigt (Kottmeier et al. 2007). Dabei spielt die Vegetationsbedeckung in städtischen Gebieten eine entscheidende Rolle. Verschiedene Studien zeigen, dass Vegetation durch Beschattung und Evapotranspiration einen kühlenden Effekt auf das städtische Mikroklima hat und insbesondere am Tag den städtischen Wärmeinseleffekt deutlich verringern kann (Gill et al. 2007; Peng et al. 2012; Ward et al. 2016). Entscheidend für die Intensität der städtischen Wärmeinsel ist außerdem die Baumassendichte eines Ballungsraumes (Früh et al. 2011; LANUV 2019). Für europäische Städte konnte gezeigt werden, dass die Ausprägung des Wärmeinseleffekts ansteigt, je kompakter eine Stadt ist (Zhou et al. 2017). Des Weiteren erhöht die flächenmäßige Ausdehnung einer Stadt den städtischen Wärmeinseleffekt (Chapman et al. 2017; Zhou et al. 2017).

Bislang zeichnete sich keine eindeutige Verstärkung des Wärmeinseleffekts in der Vergangenheit ab. So zeigen beispielsweise Messungen in Berlin seit 1975 keinen Trend der sommerlichen Wärmeinselintensität (UBA 2015; UBA 2019b). Daraus lässt sich schließen, dass die Lufttemperatur in der Kernstadt und im Umland in den letzten Jahrzehnten gleichermaßen zugenommen hat. Es kann jedoch während heißer Episoden zu einer Veränderung des Tagesgangs des städtischen Wärmeinseleffekts kommen (Fenner et al. 2019).

Die fortschreitende Urbanisierung kann in Zukunft insbesondere durch die zunehmende Verdichtung und Flächenversiegelung zu einer Verstärkung des städtischen Wärmeinseleffekts beitragen (Chapman et al. 2017). Studien in Frankfurt am Main und in Köln stellten fest, dass kommunale Nachverdichtungspläne die lokale Wärmeinselintensität deutlich verstärken können (Früh et al. 2011; Grothues et al. 2013). Maßgeblich ist dabei weniger die Erhöhung der maximalen Wärmeinselintensität der Gesamtstadt als die räumliche Ausbreitung hoher Wärmeinselintensitäten. Eine Verdichtung urbaner Gebiete kann insbesondere dann zu einer Erhöhung des Wärmeinselpotenzials führen, wenn dabei Begrünungspotenziale im Sinne einer doppelten Innenentwicklung nicht genutzt werden (Früh et al. 2011; Richter 2016).

Die Wärmeinselintensität kann aufgrund des Klimawandels sowohl zu- als auch abnehmen (Chapman et al. 2017). Daher können gegenwärtige Wärmeinselintensitäten nicht einfach zu Temperaturanstiegen aus Klimaszenarien addiert werden (Fenner et al. 2019). Vielmehr ist das Zusammenspiel unterschiedlicher regionaler Faktoren entscheidend. So verstärken geringe Windgeschwindigkeiten und ein hoher Bewölkungsgrad die Wärmeinselintensität (Arnfield 2003; Hoffmann und Schlünzen 2013). Für die anthropogenen Wärmeemissionen spielt darüber hinaus die Veränderung des Bedarfs an Heiz- und Kühlenergie eine Rolle (Chapman et al. 2017) (siehe 3.2.1 und 3.2.2). Zudem sind Wirkzusammenhänge mit der vorgelagerten Klimawirkung „Vegetation in Siedlungen“ möglich, indem zunehmende Trockenheit bei ohnehin geringerer Wasserspeicherkapazität in Städten die Evapotranspiration herabsetzt und somit sensible Wärmeströme zusätzlich antreibt (Mathey et al. 2011). Inwiefern sich dieser Prozess tatsächlich auf die Temperaturdifferenzen zwischen städtischen und ländlichen Räumen auswirken wird, ist noch ungewiss und hängt stark von zukünftigen regionalen Niederschlagsveränderungen ab. Zunehmende Trockenheit kann auch die Wärmeinselintensität senken, wenn die Abnahme der Verdunstungskühlung im Umland aufgrund geringerer Bodenversiegelung stärker ausfällt (Oleson 2012).

Projektionen für die Stadt Frankfurt am Main zeigen, dass dort die Wärmebelastungen in dicht und locker bebauten Stadtteilen in Zukunft ähnlich stark zunehmen werden (Früh et al. 2011).

Auch in Rostock konnte keine zukünftige klimawandelbedingte Veränderung der Wärmeinselintensität festgestellt werden (Richter 2016). In Hamburg ergaben Modellierungen der städtischen Wärmeinsel je nach verwendetem Klimamodell entweder keine klare klimawandelbedingte Veränderung der Wärmeinselintensität (Modell: REMO) oder eine signifikante Erhöhung der Tage mit hoher Wärmeinselintensität (Modell: CLM) (Hoffmann et al. 2018). Messungen für die Stadt Karlsruhe zeigten, dass der durchschnittliche Wärmeinselseffekt an heißen Tagen signifikant höher ist als im Sommermittel. Die in Zukunft zu erwartende höhere Anzahl heißer Tage kann demnach die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel verstärken (Hackenbruch 2018).

Grundlage der Operationalisierung

Für die Operationalisierung der vorgelagerten Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“ wurden die Siedlungsstrukturen in Bezug auf den Wärmeinselseffekt untersucht. Hierfür wurde die maximale Wärmeinselintensität (UHI_{max}) (*Indikatoren-ID: BAU-KL-05¹³*) als Proxyindikator verwendet (Abbildung 6). Indikatoren für Hitze sind Bestandteil der nachgelagerten Klimawirkung „Hitzebelastung“ aus dem Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“.

Bei der maximalen Wärmeinselintensität handelt es sich um den maximal erreichbaren Temperaturunterschied zwischen dem Inneren des verdichteten urbanen Bereichs („Innenstädte“) im Vergleich zu den städtischen Randlagen („städtisches Umland“). Die Berechnung der maximalen Wärmeinselintensität auf Grundlage von Landnutzungsdaten orientierte sich dabei an der Methodik, die bei der Berechnung der aktualisierten Testreferenzjahre¹⁴ von Deutschland angewendet wurde (DWD und BBSR 2017; Krähenmann et al. 2018). Eine weitere Berechnung der städtischen Wärmeinsel unter Berücksichtigung mikroklimatischer Parameter erfolgte nicht, weshalb von einer Darstellung absoluter Werte für die maximale Wärmeinselintensität abgesehen wurde.

Da die Ausprägung der für die städtische Wärmeinsel relevanten stadtstrukturellen Faktoren im Wesentlichen von der spezifischen Landnutzung abhängt, stellt diese einen geeigneten integralen Indikator für die Berechnung der maximalen Wärmeinselintensität dar. Für die Berechnung der maximalen Wärmeinselintensität wurden folglich Landnutzungsklassen herangezogen, die eine unter stadtklimatischen Gesichtspunkten sinnvolle Differenzierung der urbanen Oberflächenstruktur (zum Beispiel des Versiegelungsgrads) erlauben. Dazu wurden die Siedlungsflächenprojektionen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in einem Raster von 100 mal 100 Meter verwendet (Behmer 2019). Grundlage dieser Projektionen waren das Landnutzungsmodell LAND USE SCANNER und sozioökonomische Szenarien aus dem Modell PANTA RHEI Regio. Da die Siedlungsflächenprojektionen nur bis zum Jahr 2045 erstellt werden konnten, erfolgte ausschließlich eine Darstellung der Ausgangskarte von 2015 (anstelle des Bezugszeitraums) und der Projektionen für die Szenarien „Trend“ und „Dynamik“ im Jahr 2045 (für die Mitte des Jahrhunderts).

Den verschiedenen Gitterpunkten wurden zunächst der Landnutzungsclassen entsprechende Werte des Wärmeinsel-Potenzials zugeordnet und diese anschließend in einem Raster von fünf mal fünf Kilometer gemittelt (DWD und BBSR 2017). Die Zuordnung der entsprechenden Wärmeinsel-Potenziale erfolgte in Absprache mit dem DWD (Tabelle 17). Teilweise weisen die verwendeten Landnutzungsprojektionen weniger Unterklassen auf, als die CORINE-Landnutzungsclassen, welche der Berechnung der Testreferenzjahre zugrunde lagen. In diesen Fällen erfolgte eine Aggregation durch Mittelwertbildung. Dies betrifft insbesondere die Flächen städtischer

¹³ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

¹⁴ Die Testreferenzjahre (TRY) enthalten stündliche meteorologische Daten, die für eine bestimmte Klimaregion den typischen Witterungsverlauf im Jahr repräsentieren.

Prägung und führt im Ergebnis zu einer Über- oder Unterschätzung der maximalen Wärmeinselintensität in einigen Stadtteilen.

Tabelle 17: Zuordnung von Wärmeinsel-Potenzialen zu Landnutzungsklassen der „Siedlungsflächenprojektionen 2045“ des BBSR (Behmer 2019)

Identifikator	Landnutzungsklassen nach Behmer (2019)	Wärmeinsel-Potenzial
111	Flächen städtischer Prägung	0,53
121	Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude	0,4
131	Verkehrsflächen	0,17
141	Abbauf Flächen und Deponien	0,05
151	Baustellen	0,3
152	Brachen	0,05
161	Städtische Grün- und Erholungsflächen	0,03
211, 221, 311, 321, 411, 511	Ackerland, Grünland, Wald, Naturnahe Flächen und Offenland, Feuchtgebiete, Wasser	0

Aus dem auf fünf mal fünf Kilometer gemittelten Wärmeinsel-Potenzial (UHI Potenzial) wurde für jede Gitterzelle eine virtuelle Bevölkerung (E_w) berechnet. Dazu wurde folgende Formel verwendet:

$$E_w = 5 * 10^6 * UHI \text{ Potenzial}^{2,1}$$

Anschließend wurde die maximale Wärmeinselintensität (UHI_{max}) für jede Gitterzelle in Abhängigkeit von der virtuellen Bevölkerung gebildet:

$$UHI_{max} = 2,01 * \log(E_w) - 4,06$$

Zuletzt erfolgte zur Berücksichtigung lokaler Effekte die Korrektur von UHI_{max} durch entsprechende Faktoren, welche vom UHI-Potenzial abgeleitet wurden:

- Zentrale Lage: 0,7 für $0,2 \leq UHI \text{ Potenzial} < 0,5$
- Stadtrandlage: 0,5 für $UHI \text{ Potenzial} < 0,2$

Zur Darstellung der maximalen Wärmeinselintensität und zur Berechnung von Differenzkarten wurden Rasterzellen mit negativen Ergebnissen gleich null gesetzt.

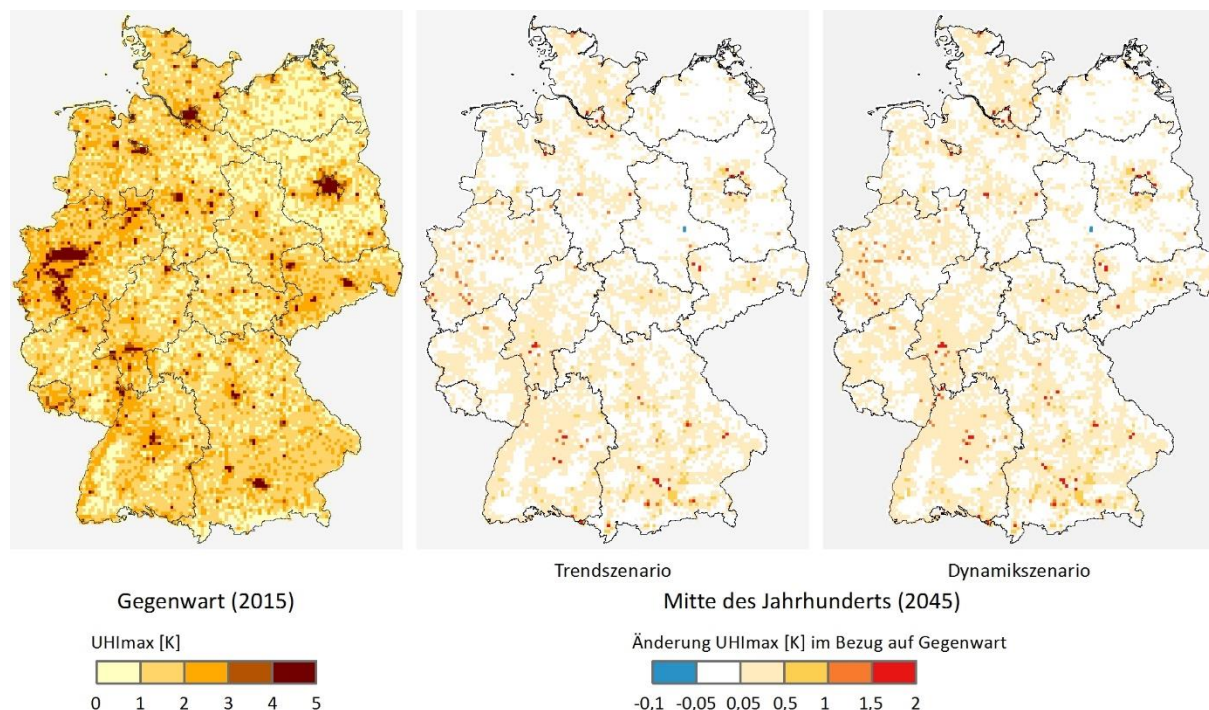
Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Die maximale Wärmeinselintensität tritt in bebauten Gebieten auf und steigt mit der baulichen Dichte an (Abbildung 6). Somit zeigen sich im Ausgangsjahr 2015 besonders hohe Werte in stark verdichteten Millionenstädten wie Berlin, Hamburg, München oder dem Städteverbund des Rhein-Ruhr-Gebiets, aber auch in Großstädten der Größe von Dresden oder Erfurt. Allerdings erreichen auch kleinere Städte wie Bamberg oder Brandenburg an der Havel eine vergleichsweise hohe maximale Wärmeinselintensität, da auch sie eine starke Verdichtung aufweisen können.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Während keine nennenswerten Veränderungen der maximalen Wärmeinselintensität in innerstädtischen Gebieten zu verzeichnen sind, zeigen die Ergebnisse eine flächenmäßige Ausdehnung der maximalen Wärmeinselintensität im städtischen Umland, wodurch mehr Menschen den Auswirkungen des städtischen Wärmeinseleffekts ausgesetzt sein werden (Abbildung 6). Aufgrund einer stärkeren Urbanisierung geht das Szenario Dynamik mit einem größeren Wachstum der städtischen Wärmeinseln einher. Aus methodischen Gründen geht aus den verwendeten Szenarien der Siedlungsflächenentwicklung bis 2045 nur eine geringe Versiegelungszunahme hervor (circa zwei Prozent über zehn Jahre). Die tatsächliche Neuversiegelung könnte durch Nachverdichtungsmaßnahmen allerdings vielerorts deutlich höher ausfallen. Es ist davon auszugehen, dass eine Kombination aus Verdichtung, Bevölkerungszunahme und klimawandelbedingten Effekten das Niveau der Wärmeinselintensität anheben wird. Hotspots werden dabei Ballungsräume besonders starker Siedlungsflächen- und Bevölkerungszunahme sein. Eine verdichtungsbedingte Abnahme von Vegetationsflächen könnte die Wärmeinselintensität zusätzlich erhöhen.

Abbildung 6: Maximale Wärmeinselintensität (UHI_{max})



Datengrundlage: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 18: „Stadtklima/Wärmeinseln“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Kernaussagen zu „Stadtklima/Wärmeinseln“

- ▶ Die zunehmende Urbanisierung führt zu einer flächenmäßigen Ausdehnung städtischer Wärmeinseln, wodurch mit einer Verstärkung der Hitzebelastung für Menschen in städtischen Verdichtungsräumen zu rechnen ist.
- ▶ Die Veränderung der Wärmeinselintensität aufgrund des Klimawandels hängt von regional unterschiedlich ausgeprägten Faktoren wie der Windgeschwindigkeit und dem Bewölkungsgrad ab, welche derzeit noch nicht klar projiziert werden können.
- ▶ Eine Kombination aus baulicher Verdichtung und höheren Bevölkerungskonzentrationen in Städten wird das Niveau der Wärmeinselintensität in Zukunft voraussichtlich anheben, insbesondere, wenn Begrünungspotenziale in der Stadtentwicklung nicht genutzt werden.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“

Sowohl die räumliche Exposition als auch die Sensitivität gegenüber einem intensiveren städtischen Wärmeinseleffekt werden durch stadtstrukturelle Faktoren wie urbane Flächenversiegelung und flächenmäßige Ausdehnung, Vegetationsbedeckung und Grünvolumen, Erhalt von Luftleitbahnen sowie das Maß der baulichen Nutzung (Baumasse und Gebäudedichte) bestimmt. Neben der Größe und Kubatur des Baukörpers haben auch die physikalischen Eigenschaften der Gebäudeoberflächen beziehungsweise das verbaute Material und teilweise auch Elemente der Gebäudetechnik einen Einfluss auf die Exposition gegenüber einer stärkeren Wärmeentwicklung in urbanen Verdichtungsräumen. Konkret sind in diesem Zusammenhang die Farbgebung von Fassaden, die Verwendung wärmespeichernder oder stark reflektierender Materialien sowie der Einsatz Abwärme-produzierender Technik wie Klimaanlage in Gebäuden von Bedeutung (BBSR 2020).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Anpassung in Bezug auf Stadtklima/Wärmeinseln kann sowohl an ganzen Siedlungsflächen als auch an einzelnen Liegenschaften und am einzelnen Gebäude ansetzen. Auf Gebäudeebene spielen die Größe und Kubatur (Umfang und Volumen) sowie die Gebäudeausrichtung vor allem mit Blick auf den Schattenwurf durch Gebäude (auf die Umgebung) eine Rolle. Betrachtet man Liegenschaften und größere zusammenhängende Siedlungsflächen stellen beispielsweise Fassaden- und Dachbegrünung und die Integration weiterer blauer und grüner Strukturen in urbane Siedlungsgebiete wichtige Elemente der Anpassung dar. Hierbei sticht das vergleichsweise hohe Grünvolumen pro Fläche von Bäumen hervor, welches zur Reduktion des Wärmeinseleffekts von großem Nutzen sein kann (Speak und Zerbe 2020). Auch aus polyzentrischen Konzepten urbaner Stadtentwicklung lassen sich – durch die dadurch mögliche Verringerung baulicher Dichte – Beiträge zum Umgang mit dem städtischen Wärmeinseleffekt ableiten (WBGU 2016). Bei der Umsetzung von Anpassung an thermische Veränderungen in Städten infolge des Klimawandels kann die Städtebauförderung eine wichtige Rolle spielen. Unter die förderfähigen Anpassungsmaßnahmen fallen auch solche, die der Verstärkung des Wärmeinseleffekts entgegenwirken können, wie beispielsweise Flächenentsiegelung und -recycling, Erhalt und Erweiterung von Grünflächen und Freiräumen sowie deren Vernetzung (VV Städtebauförderung 2020.).

Neben Maßnahmen, die der Eingrenzung des Wärmeinseleffekts und der Regulierung der Außentemperatur dienen, wäre im Rahmen der Anpassung an ein sich veränderndes Stadtklima auch der Umgang mit einer höheren thermischen Belastung in den Fokus zu nehmen (siehe Klimawirkung „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Dabei stellt die Regulierung des Innenraumklimas mithilfe bestimmter baulicher Techniken eine wichtige Komponente dar. Diesbezüglich wurden bereits verschiedene Regeln (Normen und Richtlinien) entwickelt, die sich an Planer, Sachverständige und Bauausführende richten und die gesetzlichen Vorgaben durch konkrete Maßnahmenempfehlungen, Anleitungen und Fachbewertungen konkretisieren. Beispiele hierfür sind die DIN-Norm 4108-2 zur Regelung des Wärmeschutzes und der Energie-Einsparung in Gebäuden oder die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 8 „Umweltmeteorologie - Stadtentwicklung im Klimawandel“ (DIN 4108-2: 2013-02; TMUEN 2019; VDI 3787 Blatt 8.). Wesentliche Einflussfaktoren auf die Wärmeentwicklung in Innenräumen sind das Verhältnis der massiven Fläche zur Fensterfläche, die Gebäudeausrichtung, der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung sowie die Dauer und Tageszeit der Besonnung (Balas et al. 2018).

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Anpassung an veränderte klimatische Verhältnisse in urbanen Räumen, insbesondere an eine mögliche klimawandelbedingte Intensivierung des städtischen Wärmeinseleffekts, beitragen sollen:

Tabelle 19: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“ 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. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
2.20	Bundesprogramm zur Anpassung urbaner Räume an den Klimawandel	Finanzielle Ressourcen	Projektförderung zur klimaangepassten Stadtentwicklung durch gezielte Entwicklung und Modernisierung von Grünflächen im urbanen Raum.
2.25	Machbarkeitsstudie Dach- und Fassadenbegrünung	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Erstellung einer Machbarkeitsstudie als Grundlage für die Entwicklung einer Förderrichtlinie auf Bundesebene. Hierfür ist das Auswerten laufender Förderungen von Dach- und Fassadengrün Hauptziel des Projektes. Zudem soll als Grundlage für das Aufstellen eines möglichen Förderprogrammes der Stand des Wissens zusammengefasst werden, bspw. baupraktische Lösungen und ihr Beitrag zu Klimaschutz, Minderung der sommerlichen Temperaturen, Regenwassermanagement, biologische Vielfalt.
6.1 & 7.2*; 2.32	Anpassungsbedarf bzw. klimafeste Ausgestaltung bestehender technischer Normen und Regelwerke im Bauwesen; Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Aufbau von Wissensgrundlagen, die zu einer angemessenen Berücksichtigung des Klimawandels in Normen für das Bauwesen beitragen können; Identifizierung von Normen und technischen Regelwerken des Bauwesens, die von extremen Wetterereignissen und Klimaveränderungen betroffen sein können (auf der einen Seite) sowie solcher, die Anpassung an die Folgen des Klimawandels unterstützen können (auf der anderen Seite) Neben DIN-Normen auch Normen anderer regelsetzender Institutionen in Deutschland, etwa die VDI-Richtlinien oder das DWA-Regelwerk; Etablierung baulicher Standards, die einer klimawandelbedingt höheren Frequenz und Intensität extremer Hitze und Trockenheit (und anderer Extremereignisse wie Hochwasser, Starkregen, Kanalarückstau, Hagel) Rechnung tragen und dadurch zur Verringerung der Sensitivität von Gebäuden gegenüber solchen Extremereignissen beitragen. Dazu sollen Kenntnisse über die mögliche klimawandelbedingte Veränderung von Extremereignissen in die technischen Regelwerke zur Wartung, Instandhaltung und zum Neubau von Gebäuden einfließen. [siehe auch BBSR 2020 zur Weiterentwicklung und Konkretisierung klimaangepassten Bauens (BBSR 2020)]; Beurteilungshilfen, Gebietsbelastungstabellen u. ä. wünschenswert, um sich verstärkenden Lastannahmen auf Gebäude und Bauwerke durch Hitze und Trockenheit (und andere Extremereignisse) mit sicherem bautechnischen Handeln zu begegnen.
4.17 & 4.18	Durchführung/ Förderung von Studien	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Indikatoren für ein Monitoring entwickeln (Impact-Indikatoren, Response-Indikatoren, Governance-Indikatoren) (BBSR 2016b).

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
	zu stadtplanerischen Anpassungsmaßnahmen; Entwicklung einer Methode zur Ermittlung von Maßnahmengebieten für die Reduktion von Hitzebelastung		Nachweise der realen Hitze- und UV-Belastung an relevanten Orten wie Außenbereichen von Kindergärten und Schulen oder für öffentliche Plätze fehlen; Modellierung dieser Belastung für Stadt- und Gebäudeplanung sowie Landschaftsarchitektur im Rahmen von GIS-Programmen. Ermittlung von Hot Spots der Hitzebelastung durch Überlagerung räumlich eingegrenzter Gebiete der Hitzebelastung (Andauer, Intensität, Häufigkeit) und sensibler Stadtstrukturen (z. B. Anteil Älterer, Einpersonenhaushalte, geringe Wohnfläche).
4.28	Planungswerkzeuge und Informationsmaterialien zu klimaresilienten und nicht-allergenen Stadtbäumen für Kommunen	Wissen	Informationen zu Eigenschaften verschiedener Baumarten und zu Standortfaktoren, die erläutern, wie Stadtbäume so eingesetzt werden können, dass sie durch Schatten und Transpirationsprozesse möglichst effektiv der Hitze- und UV-Belastung in stark verdichteten Siedlungsgebieten vor allem in Bodennähe entgegenwirken und zur Verbesserung des thermischen Komforts von Menschen beitragen. Lufthygiene und Kühlung: Informationen wie Luftaustausch-fördernde Kronenbildung gewährleistet wird (Luftaustausch durch nicht-luftabdeckende Kronendächer) zur optimalen Schadstoffbindung in Relation zur Blattfläche
6.3 & 2.24	Klimaanpassung durch Städtebauförderung stärken; Integration von Aspekten des klimaresilienten Bauens (Neubau und Bestand) in Förderprogramme	Finanzielle Ressourcen	Mit der zwischen Bund und Ländern weiterentwickelten und abgestimmten Verwaltungsvereinbarung Städtebauförderung 2020 sind „Maßnahmen des Klimaschutzes bzw. zur Anpassung an den Klimawandel, insbesondere durch Verbesserung der grünen Infrastruktur (beispielsweise des Stadtgrüns)“ nunmehr zwingende Fördervoraussetzung. Gebäudegestaltung, die dem Anstieg der Innentemperaturen infolge des Klimawandels auf klimafreundliche Art entgegenwirkt, z. B. durch Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes (Verschattung) und Verdunstungskühlung. Die Gebäude sollen, wo möglich und sinnvoll, über Einrichtungen verfügen, die eine Lüftung in den kühleren Nachtstunden ermöglicht (vorzugsweise Lüftungsanlagen).
6.6	Weiterentwicklung eines Leitbildes "Schwammstadt"	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen	Ermöglichung eines nachhaltigeren Umgangs mit Niederschlagswasser, z. B. Anregung der Verdunstung, um das Mikroklima zu verbessern und Hitze entgegenzuwirken. Beiträge des Schwammstadt-Modells zum Umgang mit Hitzeperioden sind zu klären.
6.12	Verbreitung von maßnahmenorientierten Informationsmaterialien, Planungswerkzeugen und Handlungsempfehlungen zu den Möglichkeiten	Wissen; Motivation und Akzeptanz; Technologie und natürliche Ressourcen	Zentrale Ansatzpunkte für mögliche Anpassungsmaßnahmen insbesondere in größeren Städten sind die Schaffung und der Erhalt von Frei- und Grünflächen, die Stadtbegrünung (z. B. Baumpflanzung und -pflege, Dach- und Fassadenbegrünung), der Erhalt und die Neuanlage von Frischluftschneisen, die Nutzung „blauer“ Infrastrukturen und die Erhöhung bzw. Senkung des Albedo-Effekts (BBSR 2016b).

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
	der Stadt- und Freiraumplanung zur Reduzierung von Hitze und UV-Belastungen		

Schwerpunkte der derzeitigen Anpassungskapazität, auf die aufgrund der bisher beschlossenen Maßnahmen und Instrumente zu schließen ist, stellen Wissenserweiterung und Bewusstseinsbildung dar, womit auch eine höhere Akzeptanz der Thematik und eine höhere Anpassungsbereitschaft im Hinblick auf die thermische Belastung in Städten einhergehen. Finanzielle Instrumente (in Form staatlicher Förderungen und Förderprogramme) kommen vor, stehen aber nicht im Fokus. Eine Rolle – wenn auch bisher eher nachgeordnet – spielen technische Ansätze sowohl zum Umgang mit als auch zur Minderung von Temperaturextremen und Trockenperioden in Städten. Speziell mit Blick darauf bedarf es der weiteren Prüfung des Modells „Schwammstadt“ und der Nutzung blauer und grüner Infrastruktur (Gewässer- und Vegetations-basierte Ansätze) im Allgemeinen. Dabei sind insbesondere Fragen zur Flächenverfügbarkeit beziehungsweise Flächennutzungs-Priorisierung, zur Verkehrssicherung sowie zu Risiken von Schadstoffeinträgen in den Boden- und Wurzelraum sowie das Grundwasser und der Ausbreitung von Krankheiten (zum Beispiel stehende Wasserflächen als Mückenbrutplätze in urbanen Räumen) zu klären.

Weiterreichende Anpassung

Basierend auf der Betrachtung der beschlossenen Maßnahmen und daraus hervorgehender Spielräume zur Weiterentwicklung der Anpassungskapazität gegenüber der Intensivierung des Wärmeinseleffekts werden entsprechende Möglichkeiten im Folgenden skizziert:

Tabelle 20: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ¹⁵	Charakteristika
Bauordnungsrechtliche Grundlage für Retentionsdächer (BBSR 2016b)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Vegetationsbestand auf Dächern dient u.a. der längeren Speicherung von (Niederschlags-) Wasser und sorgt bei Verdunstung für einen Kühlungseffekt (Schmauck 2019); zur großflächigeren Umsetzung bedarf es (rechtlich) verbindlicher Vorgaben	Gesetzgebung: Bund und Bundesländer (gesetzliche Regelungen); Umsetzung: Kommunen und Eigentümer	Teilweise sind in Bebauungsplänen bereits entsprechende Festlegungen getroffen (z. B. die Vorgabe, dass bei einer bestimmten Dachneigung ein bestimmter Prozentsatz eines Dachs zu begrünen ist) (Schmauck 2019; Begrünungsgesetz 19/531); bisher trifft dies allerdings lediglich auf einzelne Kommunen zu.
Finanzielle Anreize für Fassaden- und Dachbegrünung	Finanzielle Ressourcen; Motivation und Akzeptanz	Kühlungseffekt für Innenräume durch Fassadenbeschattung; Kühlungseffekt für Außenluft durch Verdunstung;	Gesetzgebung: Bund, Bundesländer;	Win-win: Kühlungseffekt und Verbesserung der lufthygienischen Situation (Ahlhelm et al. 2020).

¹⁵ 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 ¹⁵	Charakteristika
Bauordnungsrechtliche Festlegung/ Verpflichtung zur Nutzung heller Materialien für Fassaden (BBSR 2016a)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Verbesserung der Luftqualität (Schmauck 2019) Nutzung des Albedo-Effekts	Umsetzung: Eigentümer, Kommunen Gesetzgebung: Bund, Bundesländer	Zur Vermeidung bzw. Minderung von Überwärmungstendenzen trägt eine Erhöhung der Albedo-Werte von Dächern, Fassaden, befestigten Flächen bei; allerdings ist gleichzeitig dafür zu sorgen, dass dies kein zusätzliches Aufheizen der Umgebung bewirkt (Ahlhelm et al. 2020).
Flächenentsiegelung (BBSR 2016b; Ahlhelm et al. 2020)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Nutzung der Kühlleistung von Böden und blauer Infrastrukturen (Kastler et al. 2015)	Kommunen	Ermöglicht gleichzeitig die stärkere Nutzung der Wasseraufnahme-, Versickerungs- und Speicherfunktion des Bodens.

Mehrere der hier aufgeführten Optionen erscheinen zunächst nicht neu oder nicht sehr weiterreichend, da sie bereits in der Praxis erprobt werden (zum Beispiel Retentionsdächer, Dach- und Fassadenbegrünung). Entscheidend ist allerdings die Schaffung rechtlich bindender Vorgaben, um eine Anwendung in größerem Maßstab zu erzielen. Außerdem lassen sich anpassungsrelevante Effekte durch die Kombination von Einzelmaßnahmen steigern, beispielsweise wenn Bauwerke mehrfach genutzt werden und eine Multicodierung erfahren, sich also Nutzungen überlagern und verschiedene Funktionen miteinander verknüpft werden, etwa indem sie gleichzeitig als Gestaltungsfläche für Begrünung zur Verfügung stehen (Dosch et al. 2017).

Neben der Stärkung der Anpassungskapazität mittels rechtlicher Instrumente stellen finanzielle Anreize, beispielsweise die finanzielle Förderung von Fassadenbegrünungen, einen wichtigen Hebel dar, der sich auch hinsichtlich anderer Stadtklima-aufwertender Einzelmaßnahmen positiv auf die Umsetzungsbereitschaft auswirken könnte.

Gleichzeitig ist bei vegetationsbasierten Ansätzen die Wasserverfügbarkeit für die eingesetzten Pflanzen zu berücksichtigen. Um die Kühlleistung und luftqualitätssteigernde Wirkung von Dach- und Fassadengrün sowie Bäumen im öffentlichen Raum zu nutzen, muss eine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet sein (Ahlhelm et al. 2020) und (sofern erforderlich) die Hitze- und/oder Trockenheitstoleranz von Pflanzen als eins der ausschlaggebenden Kriterien bei deren Auswahl gelten. Bezogen auf die Kühlfunktion/-leistung ist überdies zwischen extensiven und intensiven Dachbegrünungen zu unterscheiden. Eine höhere Effizienz weisen Letztere auf, fordern jedoch auch einen höheren Ressourcen- und Energieeinsatz. Semi-intensive Dachbegrünungssysteme, für die Regenwasserbewässerung und Solarenergie genutzt werden (statt

Trinkwasser und fossile Energiequellen), befinden sich derzeit in der Erprobung (BMU und Z.U.G. 2020)¹⁶.

Das Wasserverfügbarkeitskriterium bei Fassaden- und Dachbegrünungen weist auch darauf hin, dass zur Steigerung der Anpassungskapazität gegenüber stadtklimatischen Veränderungen (insbesondere gegenüber eines sich intensivierenden Wärmeinseleffekts) die Beständigkeit der Anpassungsmöglichkeiten in den Blick zu nehmen ist. Bauordnungsrechtlich lässt sich die Nutzung bestimmter Lösungsbausteine (zum Beispiel die Errichtung von Gründächern) zwar herbeiführen. Damit diese ihre Wirksamkeit als Anpassungsmaßnahme entfalten können, müssen sowohl deren kurzfristiger Betrieb als auch deren langfristige Instandhaltung gesichert sein. So wäre etwa bei Gründächern die ausreichende Verfügbarkeit von Wasser zur Bewässerung sicherzustellen.

Auch die Weiterentwicklung von Aus- und Fortbildungsangeboten für Personal (Planer, Architekten, Handwerker) bietet sich im Zuge weiterreichender Anpassung an, um nachhaltiges Handeln zu fördern (Dosch et al. 2017) und Anpassung an die Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“ zu unterstützen. Die Qualifizierung von Mitarbeitenden wirkt sich positiv auf die Anpassungsdimensionen „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ wie auch „Motivation und Akzeptanz“ aus.

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 21: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Regionalplanung: Ausweisung bzw. Sicherung von Kalt- und Frischluftentstehungsgebieten, Kaltluftschneisen, Grünzügen, Grünzäsuren (Ahlhelm et al. 2020) - Bauleitplanung: Freiraumentwicklung im Siedlungsraum, „Doppelte Innenentwicklung“ (Adrian et al. 2018)/Begrünung (Baumpflanzung, Dach- und Fassadenbegrünung); Berücksichtigung des Biotopflächenfaktors und des Grünflächenfaktors (Mindestanteile für Vegetations- und Grünelemente); Brachflächenrenaturierung; wohnungsnaher Grünflächenversorgung; Verbindung regionaler Grünzüge mit innerörtlichen Grün- und Freiflächen (MVI 2012; Stock 2015; Ahlhelm et al. 2020) - Informelle Planungsinstrumente: Integrierte städtebauliche Entwicklungskonzepte (kommunale Ebene) - Anwendungsorientierte Forschung und Wissensverbreitung im Stadtplanungskontext: Beispielsweise werden „Werkzeuge für den klimaresilienten Stadtumbau“ entwickelt (siehe auch APA III, 6.7). Als Resultat zweier Forschungsvorhaben stehen Kommunalverwaltungen bereits praxisorientierte Arbeitsmaterialien und übertragbare Beispiele für einen klimaresilienten Stadtumbau in Form einer „Toolbox“ zur Verfügung. Darin enthaltene „Werkzeuge“ sollen u.a. der Identifizierung von geeigneten Maßnahmen und deren Finanzierungsmöglichkeiten dienen und die Verankerung des Themas in den verschiedenen Fachplanungen und Verwaltungsebenen fördern (BBSR 2016c)
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Zum Schutz vor thermischer Belastung siehe Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ (Klimawirkung „Hitzebelastung“)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

¹⁶Siehe auch: <https://www.th-bingen.de/forschung/projekte/forschungsprojekte/projekt/projekt/effizientes-innovatives-gebaeu-degruen-effin-gruen/>

Das Behördennetzwerk schätzte den zeitlichen Rahmen für Anpassungsprozesse bezogen auf die Klimawirkung „Stadtklima / Wärmeinseln“ überwiegend auf unter 50 (von der Umsetzung bis zum Eintreten der Wirksamkeit von Maßnahmen).

Tabelle 22: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Optimierte Dach- und Fassadenbegrünung - Optimierte Gestaltung öffentlicher Plätze und Freiräume
10-50 Jahre	- Stärkere Nutzung bzw. Entwicklung blauer und grüner Infrastrukturen - Vorhaltung von Wasserreserven - Stadtklima-relevante Maßnahmen im Rahmen der Regionalplanung und der Bauleitplanung - Verschattung durch Baumpflanzungen - Grundlegende Anpassung raumordnerischer Leitbilder
> 50 Jahre	- Umsetzung von grundlegend angepassten raumordnerischen Leitbildern

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Zu einer grundlegend anderen Vorgehensweise im Umgang mit stadtklimatischen Veränderungen könnte die Überlegung führen, dass es nur dann angepasster baulicher Konstruktionen und der gleichzeitigen Begrünung bedürfe, wenn der Gebäudebestand kontinuierlich in großem Maßstab erweitert würde. Ein entscheidender Beitrag zur Eingrenzung und/oder womöglich auch Verringerung der Flächenversiegelung und Verdichtung von Siedlungsflächen ließe sich demnach beispielsweise durch die Einschränkung des Flächenverbrauchs erzielen, zum Beispiel mittels einer Begrenzung der unter anderem für Wohnraum, Büro- und Einkaufsflächen pro Kopf beanspruchten Quadratmeterzahl (Bock und Libbe 2011; Referat für Stadtplanung und Bauordnung München 2019). Eine alternative – und im Ansatz gegensätzliche – Möglichkeit wäre in der (weiteren) Erhöhung der Siedlungsdichte (Einwohnerzahl je Flächeneinheit) mittels der vertikalen Gebäudeausdehnung zu sehen, bei der eine Verringerung der individuellen Flächenausstattung (Wohnfläche, Bürofläche) nicht (zwingend) erforderlich wäre.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 23: „Stadtklima/Wärmeinseln“: Wirksamkeit der Anpassung

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

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die 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 in nachstehender Tabelle ersichtlich, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 24: „Stadtklima/Wärmeinseln“: 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	1-2	1-2	3-4	3	2-3	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits für die 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.

2.2.4 Innenraumklima

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Fokus bei der Betrachtung der Klimawirkung „Innenraumklima“ ist auf die Nutzbarkeit von Innenräumen gerichtet. Zu den wesentlichen Einflussfaktoren hierfür zählen die Lufttemperatur, die Luftfeuchte und die Belüftungsverhältnisse in Wohn- und Arbeitsräumen (und damit verknüpft auch deren Hygieneverhältnisse) (Zacharias und Koppe 2015). Innenräume in öffentlichen Verkehrsmitteln für den Personentransport finden bei dieser Betrachtung keine Berücksichtigung. Auf Arbeitsräume wird in der Klimawirkung „Leistungsfähigkeit von Beschäftigten“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ genauer eingegangen.

Das Innenraumklima wird maßgeblich durch äußere klimatische Faktoren bestimmt (siehe 2.2.3) und ist der Klimawirkung „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ vorgelagert. Der durch das Innenraumklima beeinflusste Bedarf an Kühl- und Heizenergie wird im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ gesondert betrachtet.

Klimatische Einflüsse auf die Gebäudethermik sind unter anderem die Lufttemperatur, der Wolkenbedeckungsgrad, der Wasserdampfgehalt der Luft, die Windrichtung und -geschwindigkeit sowie die solare Einstrahlung (Wienert und Walter 2011). Diese Einflussfaktoren werden bei der Planung von Gebäuden einbezogen, um ein möglichst optimales Innenraumklima bei möglichst geringem Energieaufwand zu erzielen. Beispielsweise werden Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen entsprechend dimensioniert. Dazu werden unter anderem detaillierte Klimadatenreihen wie die Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes verwendet (siehe 2.2.3).

Neben den klimatischen Einflüssen wird das Innenraumklima maßgeblich durch Eigenschaften der Gebäudeaußenhülle, also Dach, Fassaden und Fenster bestimmt (Wienert und Walter 2011). Dabei spielen die Ausrichtung des Gebäudes oder einzelner Gebäudeelemente zur Sonne, die verwendeten Baustoffe, der Sonnenschutz sowie das Grünvolumen um das Gebäude eine wichtige Rolle (Wienert und Walter 2011; Bürger et al. 2017).

Für die Einschätzung des Innenraumklimas wird neben der Thermophysiologie des Menschen, die im Wesentlichen durch Klimaparameter wie Temperatur, Luftfeuchte und Einstrahlungsbedingungen (Sonneneinstrahlung, Schattenwurf, Wärmeabstrahlung von Gebäuden) beeinflusst wird, auch auf die thermische Behaglichkeit (englisch: „thermal comfort“) als Kenngröße zurückgegriffen, selbst wenn diese nicht eindeutig messbar ist (Matzarakis 2013; Fröhlich und Matzarakis 2018). Den größten Einfluss auf das Empfinden thermischer Behaglichkeit haben die Variablen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Belüftungsverhältnisse (und ähnliche Bedingungen der

Raumumgebung). Variablen wie Alter und Geschlecht haben hingegen eine wesentlich geringere Bedeutung (Rupp et al. 2015; S. 191). In der neueren Forschung dazu wird außerdem von der Anpassbarkeit der thermischen Behaglichkeit ausgegangen (anstelle eines durch die physische Kondition determiniertes Behaglichkeitsempfindens) (Dear et al. 2013; Zomorodian et al. 2016).

Zu den besonders von starker und lang anhaltender Innenraumerwärmung betroffenen Personengruppen zählen Menschen mit Risikofaktoren für „Hitzebelastung“ (siehe Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“) (Matzarakis und Ziello 2017). Besonders hitzeempfindliche Einrichtungen sind zum Beispiel Alten- und Pflegeheime, Einrichtungen für Menschen mit körperlichen und geistigen Einschränkungen, Krankenhäuser, Not- und Rettungsdienste, Einrichtungen zur Rehabilitation, Schulen, Kindertageseinrichtungen und bestimmte Arbeitsstätten (Zacharias und Koppe 2015; Straff und Mücke 2017).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Relevant im Klimawandelkontext sind vor allem hohe Innenraumtemperaturen infolge von hohen oder sehr hohen Außentemperaturen, von häufiger auftretenden und intensiveren Hitzewellen und geringem Luftmassenaustausch. Solche Bedingungen können sowohl das Aufheizen von Gebäudeaußenhüllen als auch von Innenräumen nach sich ziehen – entweder durch direktes Eindringen von Wärme und Sonneneinstrahlung oder als Folge der Erwärmung der Außenhülle des Gebäudes (Wienert und Walter 2011).

Für die Innenraumtemperatur sind insbesondere Hitzeperioden mit einer Kombination aus heißen Tagen (über 30 Grad Celsius) und Tropennächten (über 20 Grad Celsius) problematisch, da diese mit einer geringeren nächtlichen Abkühlung einhergehen und die Temperaturregulierung einschränken (Zacharias und Koppe 2015; Hoelscher et al. 2016). In verdichteten Gebieten wird diese Problematik durch den städtischen Wärmeineffekt zusätzlich verstärkt (Zacharias und Koppe 2015). Durch den Klimawandel wird sowohl die Anzahl als auch die Dauer von Hitzeperioden zunehmen (siehe „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Aufgrund der fortschreitenden Verdichtung städtischer Agglomerationsräume ist dort in Zukunft zudem von einer Zunahme der Wärmeinselintensität auszugehen (siehe 2.2.3). Darüber hinaus werden autochthone Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten und reduzierter Wolkenbildung klimawandelbedingt zunehmen, wodurch auch die Wärmebelastung in Städten tendenziell ansteigen wird (Matzarakis 2013; Fröhlich und Matzarakis 2018).

Des Weiteren kann es bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit und hoher Innenraumtemperatur zur erhöhten Freisetzung chemischer Stoffe, zum Beispiel aus Baustoffen oder Einrichtungselementen, kommen (UBA 2019a). Eine Folge wäre wiederum die erhöhte Konzentration flüchtiger organischer Stoffe in der Raumluft. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Gefahrstoffkonzentration in Innenräumen zulässige Grenzwerte überschreitet steigt dabei mit der Temperatur. Weiterhin kann die Kombination aus Wärme und hoher Luftfeuchte zum Beispiel in Altbauten zur Kondensation entlang kalter Wände führen, was das Risiko für Schimmelbefall steigen lässt. Dieser Effekt kann sich durch den Klimawandel verstärken. In neuen (oder neuartig sanierten) Gebäuden, die inzwischen üblicherweise luftdicht gebaut sind, schaffen Lüftungstechnische Anlagen Abhilfe.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 25: „Innenraumklima“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Handlungserfordernisse

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese zum Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wurde.¹⁷

Kernaussagen zu „Innenraumklima“

- ▶ Der Klimawandel wird durch die zunehmende Anzahl und Dauer von Hitzeperioden ohne bauliche Anpassungsmaßnahmen vermehrt zu hohen Innenraumtemperaturen führen.
- ▶ Innenraumtemperaturen werden in Ballungsräumen zusätzlich durch den städtischen Wärmeineffekt erhöht, dessen Intensität durch die fortschreitende Verdichtung in Zukunft tendenziell ansteigen wird.
- ▶ Neben zunehmender Hitzebelastung könnten sich steigende Innenraumtemperaturen auch negativ auf die Luftqualität und die Innenraumhygiene auswirken, indem sie die Freisetzung von Gefahrstoffen und den Schimmelbefall begünstigen.

¹⁷ Für diese Klimawirkung erfolgte jedoch keine Analyse und Einschätzung der Anpassungskapazität (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

2.2.5 Zeiten für Bautätigkeit

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Auswirkungen des Klimawandels können sich nicht nur durch das Auftreten von „Schäden an Gebäuden“ zeigen, sondern können auch die Bautätigkeiten in Deutschland beeinflussen (Wienert und Walter 2011). Potenziell sind davon sowohl der Hoch- als auch der Tiefbau betroffen. Ungünstige Witterungsbedingungen beeinflussen schon heute den Einsatz bestimmter Baumaterialien, verringern die produktiven Bauzeiten und führen zu einer geringeren Leistungsfähigkeit der Beschäftigten sowie einer höheren Gesundheitsgefährdung auf den Baustellen (Wienert und Walter 2011; BAuA 2012).

Zu den witterungsbedingten Einflüssen auf Baustellen gehören neben Frost, Feuchtigkeit, Schnee, Eis, Starkregen und hohen Windgeschwindigkeiten daher auch Hitze und Sonnenstrahlung (BAuA o.J.; Winker 2004; Wienert und Walter 2011; DGUV 2016). Bautätigkeiten an und in Bundeswasserstraßen können zusätzlich durch hohe Wassertemperaturen beeinträchtigt werden (BfG et al. 2015). Hohe Temperaturen beschleunigen den Stoffwechselumsatz im Gewässer, es kommt zu einer sogenannten Sauerstoffzehrung. Diese kann zu einem Fischsterben führen. Durch baubedingte Beeinträchtigungen von Lebens- und Rückzugsräumen, den Eintrag von Schadstoffen oder Gewässertrübungen kann die Gewässerökologie zusätzlich belastet werden (Simbeni 2009). Um diese doppelte Belastung zu vermeiden, kann es bei erhöhten Wassertemperaturen erforderlich werden, Bautätigkeiten zu unterbrechen.

Verändern sich aufgrund des Klimawandels die genannten, für Bautätigkeiten relevanten meteorologischen und hydrologischen Größen, kann dies zu einer Veränderung von Zeiten für die Bautätigkeiten führen (Wienert und Walter 2011). Dies kann wirtschaftliche Einbußen für Unternehmen in der Bauwirtschaft mit sich bringen, sofern kein entsprechender Versicherungsschutz besteht. Zusätzlich sind, insbesondere bei Bauprojekten an Infrastrukturen, Folgekosten zu erwarten.

Derzeit werden Bautätigkeiten in Deutschland vor allem durch Frost, Schnee sowie Starkregen beeinträchtigt (Wienert und Walter 2011). Als Indikator für den Einfluss der Witterung auf die Bautätigkeit werden üblicherweise die sogenannten „Schlechtwettertage“ herangezogen. Der Indikator basiert auf den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, tägliche Niederschlagssumme, Niederschlagsdauer, Schneedeckenhöhe und Neuschneehöhe (DWD 2019a). Gemäß diesem Indikator treten gegenwärtig im Flachland in Deutschland etwa 20 Tage mit erschwelter Bautätigkeit pro Jahr auf (Wienert und Walter 2011).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Ergebnisse regionaler Klimamodelle zeigen, dass die Zahl „Schlechtwettertage“ mit erschwelter Bautätigkeit im Winterhalbjahr basierend auf Projektionen von Temperatur und Niederschlag von gegenwärtig etwa 20 Tagen bis Mitte des Jahrhunderts um wenige Tage leicht abnimmt, bis Ende des Jahrhunderts jedoch um etwa die Hälfte zurückgeht (Wienert und Walter 2011).

In diesem Indikator sind mögliche Beeinträchtigungen der Bautätigkeiten an Bundeswasserstraßen nicht erfasst. Steigende Gewässertemperaturen und häufigere Niedrigwasserereignisse können in Zukunft vermehrt zu Grenzwertüberschreitungen hinsichtlich der Wasserqualität führen (siehe „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“ sowie „Chemische Wasserqualität“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“). Das kann Bautätigkeiten an Bundeswasserstraßen verzögern (BfG et al. 2015).

Auch die leistungsbeeinträchtigenden und gesundheitsgefährdenden Auswirkungen von Hitze und Ultraviolettstrahlung für die am Bau Tätigen sind über diesen Indikator nicht abgebildet. Die Hitzebelastung wird in Zukunft durch klimawandelbedingt häufiger auftretende und länger

anhaltende Hitzeperioden sowie die fortschreitende Verdichtung städtischer Agglomerationsräume zunehmen (siehe „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Dies kann auch die Verarbeitbarkeit bestimmter Baumaterialien wie Bitumen beeinträchtigen (Wienert und Walter 2011). Durch eine Zunahme der Sonnenscheinstunden (beziehungsweise eine abnehmende Bewölkung) und Wechselwirkungen mit stratosphärischem Ozon ist zudem eine Erhöhung der Belastung mit Ultraviolettstrahlung wahrscheinlich (siehe „UV-bedingte Schädigungen (insbesondere Hautkrebs)“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“).

Extremwetterereignisse wie Hitze, Starkwind und Starkregen, aber auch die potenziell steigende Belastung mit Ultraviolettstrahlung, können zu erhöhten Anforderungen im Arbeitsschutz bei Außentätigkeiten, zum Beispiel auf Baustellen, führen. Eine erhöhte Unfallgefahr oder Gesundheitsbelastung könnte zu baulichen Verzögerungen führen, entweder direkt durch Bauunterbrechungen oder indirekt durch „Leistungseinbußen von Beschäftigten“ (siehe Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 26: „Zeiten für Bautätigkeit“: 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 „Zeiten für Bautätigkeit“

- ▶ Tage mit erschwerter Bautätigkeit (sogenannte „Schlechtwettertage“) werden basierend auf Projektionen von Temperatur und Niederschlag von gegenwärtig etwa 20 Tagen pro Jahr bis Mitte des Jahrhunderts um wenige Tage und bis Ende des Jahrhunderts um etwa die Hälfte zurückgehen.
- ▶ Starkwind, Starkregen, Hitze und Belastungen mit Ultraviolettstrahlung können die Unfallgefahr und die Gesundheitsbelastung auf Baustellen erhöhen und so aus Gründen des Arbeitsschutzes zu Bauunterbrechungen führen.
- ▶ Klimawandelbedingt zunehmende Hitze und Belastungen mit Ultraviolettstrahlung sowie steigende Unfallgefahren können zu Verzögerungen der Bautätigkeit führen, da sie die Leistungsfähigkeit von Beschäftigten, insbesondere im Freien, einschränken.

2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Im Handlungsfeld „Bauwesen“ werden bereits Anstrengungen zur Anpassung an den Klimawandel unternommen. So werden seit einigen Jahren technische Regelwerke und Normen auf ihren Anpassungsbedarf an sich ändernde bauliche Anforderungen (infolge des Klimawandels) überprüft (Bundesregierung 2015) und entsprechende Änderungen bereits vorgenommen. Weiterhin werden im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie flankierende Strukturen geschaffen, über die eine Institutionalisierung des Themas Klimafolgenanpassung befördert wird. Relevant für das Handlungsfeld „Bauwesen“ ist beispielsweise der Ständige Ausschuss Klimawandel der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-AK), der sich unter anderem mit Anpassungsmöglichkeiten an klimawandelbedingt zunehmende (Fluss-)Hochwasserrisiken befasst.

Auch im Baugesetzbuch sind bereits Festlegungen getroffen, die mit Blick auf Klimaanpassung in der baulichen Entwicklung von Städten und Gemeinden von Bedeutung sind, unter anderem hinsichtlich der Niederschlagswasserbewirtschaftung, der Hochwasservorsorge und der thermischen Regulierung in Städten. Mit der sogenannten „Klimaschutznovelle“ aus dem Jahr 2011 und der Novelle von 2013, durch die (auch) Klimaanpassung zum Abwägungsgegenstand wurde – das heißt ein Stadtumbaumaßnahmen-induzierender erheblicher städtebaulicher Funktionsverlust liegt unter anderem vor, wenn Klimaanpassungsanforderungen nicht erfüllt werden (§171a Absatz 2 Baugesetzbuch) –, erweiterte sich der Handlungsspielraum für Kommunen zur planerischen Festsetzung von Maßnahmen, die Klimaanpassungszwecke erfüllen. Beispiele sind die planerische Darstellung von Regenwasserversickerungs- und Hochwasserschutzanlagen, die Sicherung von Luftleitbahnen und Grünflächen (Weidlich 2019; Ahlhelm et al. 2020). Gleichwohl sind (noch) Defizite bei der Nutzung dieses erweiterten Handlungsspielraums festzustellen (Birkmann et al. 2013; Sprondel et al. 2016; Baumüller 2018; Diepes und Müller 2018; Weidlich 2019) (siehe Teilbericht 1, „Beiträge der Raumordnung, Regional-, und Bauleitplanung zur Anpassungskapazität“).

Sowohl die Anzahl als auch das Spektrum der mit dem APA III beschlossenen Maßnahmen und darüberhinausgehender Möglichkeiten der Anpassung bezogen auf die Klimawirkungen „Schäden an Gebäuden“, „Stadtklima/Wärmeinseln“ und „Vegetation in Siedlungen“ ist vergleichsweise groß beziehungsweise breit. Speziell mit Blick auf Gebäudeschäden ist weiter zwischen den Gefährdungsarten zu unterscheiden. Zudem überschneiden sich Ansätze und Maßnahmen zur Anpassung an erhöhte Gebäudeschadensrisiken zum einen aufgrund zunehmender Starkregenhäufigkeit/-intensität und zum anderen aufgrund zunehmender Hochwasserhäufigkeit/-dauer in positiver Art und Weise. Ansatzpunkte zur Minderung der Gebäudegefährdung durch häufigere und intensivere Starkregenereignisse sind in der Oberflächenabflusssteuerung und -zwischenspeicherung zu sehen (BBSR 2016b; HLNUG 2020a; HLNUG 2020b), worunter auch die Weiterentwicklung des Schwammstadt-Modells fällt (APA III: 6.5). Weitere Möglichkeiten bestehen in der Einrichtung von Notwasserwegen (zum Beispiel Straßen, über die der Wasserabfluss reguliert werden kann) (Deutscher Städtetag 2016; INKOKA 2016) und von Frühwarnsystemen (APA III: 1.27; 1.28) und deren Kopplung mit Notfallplänen (wobei dies bei Starkregen schwieriger umzusetzen ist als bei Hochwasser) (Kreibich et al. 2016). Eine wesentliche Rolle spielt auch die Dokumentation beziehungsweise das Monitoring von Starkregen – was letztlich für die Verbesserung der Modellierung nützlich sein kann (APA III: 1.18; 7.22).

Bei den beschlossenen Maßnahmen (APA III) zur Anpassung an eine potenziell zunehmende Gefährdung von Gebäuden durch Flusshochwasser, an die mögliche Intensivierung des Wärmeinseleffekts und an schwierigere Bedingungen für Vegetation in Siedlungen spielt der Einsatz von Technologien und die Nutzung natürlicher Ressourcen eine wichtige Rolle. Außerdem sind die

Vertiefung des Kenntnisstands sowohl in wissenschaftlicher Hinsicht (Ermittlung räumlicher Hotspots und Studien zu stadtplanerischen Anpassungsmaßnahmen, Baumkataster, Ökosystemleistungen von Siedlungsvegetation/Stadtgrün) als auch in der breiten Öffentlichkeit (beispielsweise zu Fassaden-/Dachbegrünung, klimaangepassten Baumaterialien, hochwasserexponierten Standorten) wesentliche Komponenten zur Gestaltung von Anpassungsprozessen im Gebäude- und Siedlungsbereich. Auch die Möglichkeiten, die für eine weiterreichende Anpassung bezogen auf die genannten Klimawirkungen denkbar sind, lassen sich vornehmlich den Bereichen Technologie und natürliche Ressourcen, Wissen sowie regulatorische Rahmenbedingungen und politische Strategien zuordnen.

Hinsichtlich der Anpassungsdimension „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ mit spezifischer Relevanz für das Handlungsfeld „Bauwesen“ sind beispielsweise Mainstreaming-Aktivitäten zum Thema Klimaanpassung seitens nicht-staatlicher regelsetzender Institutionen wie dem Deutschen Institut für Normung (DIN), der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), den Industrie- und Handelskammern sowie den Handwerkskammern der Bundesländer oder dem Deutschen Verband der Ingenieure (VDI) zu verzeichnen. Seitens des Deutschen Instituts für Normung zählt dazu die Einrichtung eines Arbeitskreises innerhalb der Koordinierungsstelle Umwelt, der sich dem Thema Anpassung an den Klimawandel widmet (DIN 2019). Außerdem erarbeitete der Normenausschuss der gemeinsam vom DIN und VDI eingesetzten Kommission „Reinhaltung der Luft“ zum Beispiel die im Klimaanpassungskontext relevante Richtlinie „Umweltmeteorologie – Stadtentwicklung im Klimawandel“ (VDI 3787 Blatt 8) und plant die Herausgabe einer weiteren Richtlinie zur „Umweltmeteorologischen Bedeutung der grünen Infrastruktur in Städten“ (KRdL 2020). Auch innerhalb der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft existiert eine Klimawandel- und Anpassungs-fokussierte Koordinierungsgruppe („Wasserwirtschaftliche Strategien zum Klimawandel“). Im Zuge solcher Aktivitäten zur Institutionalisierung des Themas Klimaanpassung durch die Aufnahme in Regelwerke, Normen und Richtlinien und damit der Aufbereitung des Kenntnisstands zum Thema für die Praxis (Bauleitplanung/Fachplanungen und Bauwesen) kann auch das Bewusstsein für Anpassungserfordernisse bei den Zielgruppen gesteigert werden (Anpassungsdimension „Motivation und Akzeptanz“).

Mit Blick auf die Verfügbarkeit finanzieller Ressourcen als weitere Anpassungsdimension ist insbesondere die reformierte Städtebauförderung hervorzuheben, durch die Klimaanpassung auf kommunaler Ebene eine deutliche Stärkung erfahren hat. Die damit förderfähigen Maßnahmenbausteine wie Bodenentsiegelung, Flächenrecycling, der Erhalt und die Erweiterung von Grünflächen und Freiräumen (VV Städtebauförderung 2020.) können auch konkrete Beiträge zur Anpassung an klimawandelbedingte Gebäudeschadensrisiken durch Flusshochwasser, höhere Wärmeinselintensität und die potenzielle Beeinträchtigung der Siedlungsvegetation leisten.

Überlegungen zu transformativer Anpassung tendieren zum konsequenteren Freihalten von beispielsweise Hochwasser-gefährdeten Flächen und generell zur Begrenzung der (pro-Kopf-) Inanspruchnahme von bebauter Fläche und Baumasse, da jeder gebaute Quadratmeter Geschossfläche und Fassade weiteren Anpassungsbedarf erzeugt.

Die beschlossenen Maßnahmen und weiterreichenden Möglichkeiten zur Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“ nehmen im Wesentlichen einen zeitlichen Rahmen von mehreren Jahrzehnten ein (von der Initiierung/Planung bis zum Wirksamwerden). Insbesondere Maßnahmen auf der Ebene einzelner Gebäude (Wärmeschutz, Hochwasserschutz) können hingegen innerhalb kürzerer Zeiträume (das heißt unter zehn Jahre) umgesetzt und wirksam werden und gelten dann für den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes (50 bis 80 Jahre).

2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Aufgrund der Bezüge der einzelnen Klimawirkungen des Handlungsfelds zueinander wirken diverse der aufgezeigten Anpassungsmaßnahmen auf Faktoren der räumlichen Exposition und Sensitivität bei mehreren Klimawirkungen gleichzeitig ein. Zum Beispiel dient die „Weiterentwicklung des Leitbilds Schwammstadt“ der Anpassung an eine erhöhte Gebäude- und Infrastrukturgefährdung durch häufigere Starkregenereignisse und an Veränderungen des Stadtklimas und der Standortbedingungen für Siedlungsvegetation durch häufigere, längere oder jahreszeitlich verschobene Hitze- und Trockenperioden. Auch der Ansatz des „Klimaangepassten Bauens“ zielt gleichzeitig auf die Verringerung extremwetterbedingter Gebäudegefährdung und auf die Begrenzung der thermischen Belastung sowohl in Innenräumen als auch außerhalb von Gebäuden in (städtischen) Verdichtungsräumen ab. Hierbei ist auch der enge Zusammenhang zwischen Siedlungsvegetation und dem Stadtklima zu berücksichtigen. So ist die Eindämmung der klimawandelbedingten Beeinträchtigung bestehender Siedlungsvegetation und die Berücksichtigung des Hitze- und Trockenheitstoleranz-Kriteriums bei der Auswahl neu zu pflanzender Gewächse bedeutsam für die Regulierung des Wärmeinseleffekts in Städten und für die Reduzierung der Hitzebelastung, sowohl im Gebäudeinneren als auch außerhalb von Gebäuden, insbesondere in urbanen Verdichtungsräumen. Einen wichtigen Beitrag zur Regulierung sowohl von Gebäudeinnentemperaturen als auch Außentemperatureffekten durch Gebäude kann Fassadenbegrünung – bei ausreichender Wasserversorgung – leisten (Hoelscher et al. 2016). Effekte stellen sich sowohl für die Temperatur der Außenfassade als auch – wenngleich in geringerem Ausmaß – für die innenliegenden Wände ein. Dabei hat die Verschattung der Fassade den entscheidenden kühlenden Einfluss auf Bauteile, während die Transpiration durch die Pflanzen einen weniger starken Kühlungseffekt hat. Darüber hinaus – und vor allem relevant für das Innenraumklima im Winterhalbjahr – kann eine Fassadenbegrünung einen wärmeisolierenden Einfluss haben, da sie die nächtliche Strahlung (also Wärmeabgabe) reduzieren kann.

Eine zusätzliche Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Bauwesen“, speziell gegenüber (fluss-)hochwasserbedingten Gebäudeschadensrisiken geht von Anpassungsbemühungen aus, die sich konkret auf Veränderungen der Abflussmengen bei Flüssen im Zuge des Klimawandels beziehen. Als relevante Ansätze sind hier (neben den beschlossenen Maßnahmen zum angepassten Hochwasserschutz gemäß APA III) die Renaturierung von Auen und deren Nutzung als natürliche Überflutungsflächen, die Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten, in denen starke oberirdische Abflüsse eintreten können, sowie die Ausweitung der Risikokommunikation zu nennen (WHG 2009).

2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Wichtige Beiträge zur Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Bauwesen“ leisten die Regionalplanung und die Bauleitplanung, die Nutzungsstrukturen und -verteilungen konkret regeln. Insbesondere die Effekte der Bauleitplanung auf die Anpassungsfähigkeit in Siedlungsräumen und auch auf Gebäudeebene sind erheblich. Auf beiden Ebenen der Bauleitplanung – Flächennutzungspläne und Bebauungspläne – können zahlreiche bauliche Aspekte von Bauvorhaben in Bezug auf Klimaanpassung festgelegt werden, nämlich unter anderem Gebäudestellung, Gebäudedichte und Flächenfreihaltung, der Einsatz von Lüftungselementen, Wärmeschutz und Beschattungselementen, Gebäudebegrünungen sowie angepasste Entwässerungssysteme oder Abdichtungen gegen Wasserschäden (Stock 2015).

Aus dem Bereich der Finanzwirtschaft stellen Versicherungen eine wesentliche Komponente der Anpassungsfähigkeit gegenüber Extremereignisgefahren für Gebäude dar. Im Rahmen der Elementarschadensversicherung lassen sich Gebäude gegenüber Schäden infolge von Überschwem-

mung, Starkregen, Sturm, Hagel, Schneedruck, Lawinen (sogenannten „Naturgefahren“) versichern (GDV 2019b). Darüber hinaus setzen Versicherungen mit Preisstrukturen und Prämienaktionen für klimaangepasstes Bauen Anreize für Klimawandelanpassung (Welp et al. 2010). In größerem Maßstab können sowohl Banken als auch Versicherungen in ihrer Rolle als institutionelle Investoren klimaangepasste Bauprojekte fördern beziehungsweise durch ihre indirekte Beteiligung an Bauprojekten auf Klimaanpassung hinwirken.

Darüber hinaus können Katastrophenschutzeinrichtungen wichtige Beiträge zur Vorsorge vor und Anpassungsplanung an Starkregen- und (Fluss-)Hochwasserereignissen leisten, beispielsweise in Form von Erfahrungsaustausch mit beziehungsweise Beratung von zuständigen Behörden und Infrastrukturbetreibern. Dies kann unter anderem die Lokalisierung und Beseitigung von Schwachstellen (gegenüber Starkregen) in Kanalisationssystemen umfassen oder die Erarbeitung Anreiz-schaffender Maßnahmen für Privatpersonen auf Grundlage von Einsatzerfahrungen (Kutschker 2019).

2.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 27: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungsempfehlungen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.							
		Gegen- wart	2031-2060		2071-2100		
			optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		mittel	mittel	mittel- hoch	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegen- wart	2031-2060		2071-2100		An- pas- sungs- dauer
			optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Vegetation in Siedlungen	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	> 50 Jahre
	Gewissheit		hoch		hoch		
Stadtklima/ Wärmeinseln	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Innenraumklima	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Zeiten für Bautätigkeit	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		

Tabelle 28: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Bauwesen“

	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	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
		mittel	mittel			
Vegetation in Siedlungen	gering	gering-mittel	gering	hoch	mittel	ja
		mittel	gering-mittel			
Stadtklima/Wärmeinseln	gering-mittel	mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
		mittel	mittel			

Tabelle 29: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegen- wart	2031-2060		2020- 2030	2031-2060			
		optimis- tisch	pessimis- tisch		optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit An- passung	mittel	mittel	mittel- hoch	gering- mittel	gering- mittel	mittel	gering	gering- mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Schäden an Gebäu- den aufgrund von Flusshochwasser	mittel	mittel	hoch	mittel	gering- mittel	mittel- hoch	gering	mittel
Vegetation in Sied- lungen	gering	mittel	mittel	gering	gering- mittel	mittel	gering	gering- mittel
Stadtklima/Wär- meinseln	mittel	mittel	hoch	gering- mittel	gering	mittel- hoch	gering	mittel

2.5 Quellenverzeichnis

- Adrian, L.; Bock, S.; Bunzel, A.; Preuß, T.; Rakel, M. (2018): Instrumente zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme. Aktionsplan Flächensparen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- 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.
- Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Arnfield, A. J. (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23, S. 1–26. doi:10.1002/joc.859.
- Balas, M.; Weisz, U.; Groß, R.; Nowak, P.; Wallner, P.; Allerbeger, 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.; Zuvela-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.
- Bauherren-Schutzbund e.V.; VHV Allgemeine Versicherung AG; Institut für Bauforschung e.V. (Hrsg.) (2018): Bauschäden durch Klimawandel. Gemeinschaftsprojekt vom Bauherren-Schutzbund e.V., der VHV-Allgemeine Versicherung AG und dem Institut für Bauforschung e.V., Berlin, Hannover.
- Baumüller, J.; Ahmadi, Y. (2016): Beitrag von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen und freiraumplanerischen Gestaltungselementen zur Verbesserung des Stadtklimas. im Rahmen des Forschungsprojekts „Stadt als hydrologisches System im Wandel. Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushalts“ (SAMUWA). Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
- Baumüller, N. (2018): Stadt im Klimawandel. Klimaanpassung in der Stadtplanung: Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente. Städtebau-Institut der Universität Stuttgart. doi:10.18419/OPUS-9821.
- Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) (Hrsg.) (2018): "Projekt Stadtgrün 2021". Selektion, Anzucht und Verwendung von Gehölzen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. KL/17/03., Veitshöchheim.
- Becker, P.; Becker, A.; Dalelane, C.; Deutschländer, T.; Junghänel, T.; Walter, A. (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- Begrünungsortsgesetz: Ortsgesetz über die Begrünung von Freiflächen und Flachdachflächen in der Stadtgemeinde Bremen vom 19/ 531. Ursprünglich gefasst 21.03.2019.
- Behmer, J. (2019): Siedlungsflächenprojektion 2045. Abschlussbericht. Climate Change 02/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Berg, P.; Haerter, J. O. (2013): Unexpected increase in precipitation intensity with temperature — A result of mixing of precipitation types? *Atmospheric Research* 119, S. 56–61. doi:10.1016/j.atmosres.2011.05.012.
- Bergmann, E.; Bender, J.; Weigel, H.-J. (2015): Assessment of the impacts of ozone on biodiversity in terrestrial ecosystems: Literature review and analysis of methods and uncertainties in current risk assessment approaches. Part II: Literature review of the current state of knowledge on the impact of ozone on biodiversity in terrestrial ecosystems. On behalf of the Federal Environment Agency (Germany). Texte 71/2015. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Birkmann, J.; Vollmer, M.; Schanze, J. (2013): Raumentwicklung im Klimawandel. Herausforderungen für die räumliche Planung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Hannover.

- Bock, S.; Libbe, J. (2011): Nachhaltiges Flächenmanagement - ein Handbuch für die Praxis. Ergebnisse aus der REFINA-Forschung. Deutsches Institut für Urbanistik (Difu), Weimar, Berlin.
- Böttcher, F.; Deutschländer, T.; Friedrich, A. (2017): Nationaler Klimareport. Klima - Gestern, heute und in der Zukunft. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach.
- Bronstert, A.; Bormann, H.; Bürger, G.; Haberlandt, U.; Hattermann, F.; Heistermann, M.; Huang, S.; Kolokotronis, V.; Kundzewicz, Z.; Menzel, L.; Meon, G.; Merz, B.; Meuser, A.; Paton, E. N.; Petrow, T. (2017): Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg.) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 87–100.
- Bruse, M. (2003): Stadtgrün und Stadtklima. Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. LÖBF-Mitteilungen 2003 (1), S. 66–70.
- 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.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (o.J.): Empfehlungen für heiße Sommertage in Arbeitsstätten. Download unter <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physikalische-Faktoren-und-Arbeitsumgebung/Klima-am-Arbeitsplatz/Sommertipps.html>. Stand: 28.10.2019.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Hrsg.) (2012): Faktenblatt 11 "Arbeitsbedingungen am Bau - Immer noch schwere körperliche Arbeit trotz technischen Fortschritts". Factsheet 11, Dortmund.
- 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.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2010): Klimaangepasstes Bauen - Kriteriensteckbrief „Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren: Wind, Starkregen, Hagel, Schnee/feuchte Winter und Hochwasser". Endbericht.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2015): Wachsen oder schrumpfen? BBSR-Typisierung als Beitrag für die wissenschaftliche und politische Debatte. BBSR-Analysen KOMPAKT 12/2015.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016a): Klimaresilienter Stadtumbau. Bilanz und Transfer von StadtKlimaExWoSt, Bonn.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016b): Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region. Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen, Bonn.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016c): Querauswertung zentraler Verbundvorhaben des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel mit Fokus Stadt- und Regionalentwicklung. BBSR-Online-Publikation 04/2016, Bonn.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2018): GIS-ImmoRisk Naturgefahren. Geoinformationssystem zur bundesweiten Risikoabschätzung von zukünftigen Klimafolgen für Immobilien, Bonn.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2019): Wie grün sind bundesdeutsche Städte? – Fernerkundliche Erfassung und stadträumlich-funktionale Differenzierung der Grünausstattung von Städten in Deutschland (Erfassung der urbanen Grünausstattung). Download unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ReFo/Staedtebau/2019/gruenmonitoring/01-start.html?nn=2148856>. Stand: 15.08.2019.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2020): KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens. Endbericht, Bonn.

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU); Z.U.G. (Hrsg.) (2020): Übersicht der geförderten Projekte. Förderprogramm "Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel". Download unter https://www.z-u-g.org/fileadmin/user_upload/download_pdf/uebersicht_DAS_foerderprogramm_bf.pdf.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.
- Bürger, V.; Hesse, T.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P.; Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 - Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Chapman, S.; Watson, J. E. M.; Salazar, A.; Thatcher, M.; McAlpine, C. A. (2017): The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecol* 32, S. 1921–1935. doi:10.1007/s10980-017-0561-4.
- Dear, R. J. de; Akimoto, T.; Arens, E. A.; Brager, G.; Candido, C.; Cheong, K. W. D.; Li, B.; Nishihara, N.; Sekhar, S. C.; Tanabe, S.; Toftum, J.; Zhang, H.; Zhu, Y. (2013): Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor air*, S. 442–461. doi:10.1111/ina.12046.
- Dehnhardt, A.; Hirschfeld, J.; Drückler, D.; Peschow, U.; Engel, H.; Hammer, M. (2008): Kosten-Nutzen-Analyse von Hochwasserschutzmaßnahmen. Texte 31/08. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (Hrsg.) (2016): DGUV Information 203-085 „Arbeiten unter der Sonne“. Handlungshilfe für Unternehmerinnen und Unternehmer, Berlin.
- Deutscher Städtetag (Hrsg.) (2016): Starkregen und Sturzfluten in Städten. Eine Arbeitshilfe, Berlin, Köln.
- Deutscher Städtetag (Hrsg.) (2019): Anpassung an den Klimawandel in den Städten. Forderungen, Hinweise und Anregungen. Deutscher Städtetag, Berlin, Köln.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2017): Die Wetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes. Amtlich, zuverlässig und aus einer Hand, Offenbach.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2019a): Behinderungsstufen an Schlechtwettertagen. Nach Intensitäten der Witterungserscheinungen, Offenbach.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2019b): Starkregen. Download unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>. Stand: 19.07.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2017): Handbuch. Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Offenbach.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.) (2019): Jahresbericht der Koordinierungsstelle Umweltschutz (KU), Berlin.
- Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V. (DKKV); Universität Potsdam (Hrsg.) (2015): Das Hochwasser im Juni 2013. Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland 53, Bonn.
- Dickhaut, W.; Eschenbach, A. (Hrsg.) (2018): Entwicklungskonzept Stadtbäume. Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen. HafenCity Universität Hamburg, Hamburg.
- Die Deutschen Versicherer (2021): Starkregen: Wuppertal hat die meisten hoch gefährdeten Häuser. Download unter <https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/starkregen--wuppertal-hat-die-meisten-hoch-gefaehrdeten-haeuser-66618>. Stand: 20.04.2021.
- 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.

DIN 4108-2: 2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden- Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. doi:10.31030/1929159.

Dosch, F.; Mayer, F.; Schröder, A.; Bunge, C.; Hülsmann, W.; Vetter, A.; Hommes, M.; Lehmhus, C. Langenbrinck, G.; Berding, U.; Habermann-Nieße, K.; Becker, C. W.; Balder, H. (2017): Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt - Für eine lebenswerte Zukunft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin.

Duthweiler, S.; Pauleit, S.; Rötzer, T.; Moser, A.; Rahman, M.; Stratopoulos, L.; Zölch, T. (2017): Untersuchungen zur Trockenheitsverträglichkeit von Stadtbäumen. Studies on the drought resistance of urban trees. In: D. Dujesiefken (Hrsg) Jahrbuch der Baumpflege 2017. Yearbook of Arboriculture. – Jahrbuch der Baumpflege 21. Braunschweig. S. 137–154.

Endlicher, W. (2018): Stadtnatur für die Anpassung an den Klimawandel. In: Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg) Ökosystemleistungen und deren Inwertsetzung in urbanen Räumen. – BfN-Skripten. Bonn. S. 23–31.

Falter, D.; Dung, N. V.; Vorogushyn, S.; Schröter, K.; Hundedcha, Y.; Kreibich, H.; Apel, H.; Theisselmann, F.; Merz, B. (2016): Continuous, large-scale simulation model for flood risk assessments: proof-of-concept. J. Flood Risk Manage 9 (1), S. 3–21. doi:10.1111/jfr3.12105.

Fellhölder, G.; Schreiner, M.; Zander, M.; Ulrichs, C. (2018): Erste Ergebnisse zur Eignung neuer Baumarten an stark belasteten Straßenstandorten in Berlin-Neukölln. Pro Baum 2018 (2).

Fenner, D.; Holtmann, A.; Meier, F.; Langer, I.; Scherer, D. (2019): Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes. Environ. Res. Lett. (14 (12)). doi:10.1088/1748-9326/ab506b.

Figueiredo, R.; Schröter, K.; Weiss-Motz, A.; Martina, M. L. V.; Kreibich, H. (2018): Multi-model ensembles for assessment of flood losses and associated uncertainty. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 18 (5), S. 1297–1314. doi:10.5194/nhess-18-1297-2018.

Fitzky, A. C.; Sandén, H.; Karl, T.; Fares, S.; Calfapietra, C.; Grote, R.; Saunier, A.; Rewald, B. (2019): The interplay between ozone and urban vegetation – BVOC emissions, ozone deposition, and tree ecophysiology. Frontiers in Forests and Global Change 50 (2), S. 1–17.

Fröhlich, D.; Matzarakis, A. (2018): Spatial Estimation of Thermal Indices in Urban Areas - Basics of the SkyHelios Model. Atmosphere 9 (6). Aufsatznummer 209. doi:10.3390/atmos9060209.

Früh, B.; Koßmann, M.; Roos, M. (2011): Frankfurt am Main im Klimawandel. Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach am Main.

GALK Stadtbäume (2009): Positionspapier Klimawandel und Stadtbäume.

GEO-NET (2011): Leitfaden zur Berücksichtigung klimatischer Ausgleichsfunktionen in der räumlichen Planung am Beispiel der Regionen Mittlerer Oberrhein und Nordschwarzwald. Regionalverband Nordschwarzwald, Regionalverband Mittlerer Oberrhein, Stadt Baden-Baden, Hannover.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2018): Naturgefahrenreport 2018. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2019a): Forschungsprojekt Starkregen. Summary. November 2019, Berlin.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2019b): Naturgefahrenreport 2019. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2019c): Serviceteil zum Naturgefahrenreport 2019. Tabellen · Grafiken · Karten, Berlin.

- Gill, S. E.; Handley, J. F.; Ennos, A. R.; Pauleit, S. (2007): Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment* 33 (1), S. 115–133. doi:10.2148/benv.33.1.115.
- Golz, S.; Schinke, R.; Naumann, T. (2015): Assessing the effects of flood resilience technologies on building scale. *Urban Water Journal* 12 (1), S. 30–43. doi:10.1080/1573062X.2014.939090.
- Greiving, S.; Hurth, F.; Gollmann, C.; Kirstein, M.; Fleischhauer, M.; Hartz, A.; Saad, S. (2018): Siedlungsrückzug als planerische Strategie zur Reduzierung von Hochwasserrisiken. *Raumforsch Raumordn* 76 (3), S. 193–209. doi:10.1007/s13147-018-0533-4.
- Grothmann, T. (2017): Was motiviert zur Eigenvorsorge? Motivationseffekte von Beteiligungsprozessen in der Klimawandelanpassung. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Grothues, E.; Köllner, B.; Ptak, D.; Dalemene, C.; Deutschländer, T.; Ertel, H.; Hafer, M.; Halbig, G.; Kessler-Lauterkorn, T.; Koch, C.; Koßmann, M.; Malitz, G.; Roll, O.; Schmitt, A.; Weigl, E.; Winterrath, T.; Hartwig, C.; Wiczorrek, Y.; Rüsing, F.; Schwerdt, I. (2013): Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abschlussbericht. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Recklinghausen.
- 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.
- Hattermann, F. F.; Huang, S.; Burghoff, O.; Hoffmann, P.; Kundzewicz, Z. W. (2016): Brief Communication: An update of the article "Modelling flood damages under climate change conditions – a case study for Germany". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16 (7), S. 1617–1622. doi:10.5194/nhess-16-1617-2016.
- Heaviside, C.; Macintyre, H.; Vardoulakis, S. (2017): The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current environmental health reports* 4 (3), S. 296–305. doi:10.1007/s40572-017-0150-3.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Hrsg.) (2020a): Schäden durch Starkregen vermeiden. Unterstützung für hessische Kommunen. HLNUG, Wiesbaden.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (Hrsg.) (2020b): Starkregen und kommunale Vorsorge. HLNUG, Wiesbaden.
- Hirschfeld, J.; Mohaupt, F.; Müller, R.; Klein, M.; Rioussel, P.; Welling, M. (2019): Stadtgrün wertschätzen! Städte können vom Ausbau der Grünflächen ökologisch, ökonomisch und sozial profitieren. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 28 (4), S. 392–393. doi:10.14512/gaia.28.4.14.
- Hoelscher, M.-T.; Nehls, T.; Jänicke, B.; Wessolek, G. (2016): Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings* 114, S. 283–290. doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.04.
- Hoffmann, P.; Schlünzen, K. H. (2013): Weather Pattern Classification to Represent the Urban Heat Island in Present and Future Climate. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 52 (12), S. 2699–2714. doi:10.1175/JAMC-D-12-065.1.
- Hoffmann, P.; Schoetter, R.; Schlünzen, K. H. (2018): Statistical-dynamical downscaling of the urban heat island in Hamburg, Germany. *metz* 27 (2), S. 89–109. doi:10.1127/metz/2016/0773.
- Interkommunale Koordinierungsstelle Klimaanpassung (INKOKA) (Hrsg.) (2016): Leitfaden zur Starkregenvorsorge. Ein Nachschlagewerk für Kommunen der Metropolregion Nordwest. Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e. V., Delmenhorst.
- Janssen, G.; Rubel, C.; Schulze, F.; Keimeyer, F. (2016): Siedlungsrückzug – Recht und Planung im Kontext von Klima- und demografischem Wandel. *Climate Change* 21/2016. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Kastler, M.; Molt, C.; Kaufmann-Boll, C.; Steinbrücke, M. (2015): Kühlleistung von Böden. Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW. *Lanuv-Arbeitsblätter* 29. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Recklinghausen.
- Katzenberger, B. (2012): Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen. Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. 5. KLIWA Symposium am 6. - 7.12.2012, Würzburg.

- Ketterer, C.; Matzarakis, A. (2014): Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning* 122, S. 78–88. doi:10.1016/j.landurbplan.2013.11.003.
- Ketterer, C.; Matzarakis, A. (2015): Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *Int J Biometeorol* 59 (9), S. 1299–1309. doi:10.1007/s00484-014-0940-3.
- Kind, C.; Kaiser, T.; Riese, M.; Bubeck, P.; Müggenburg, E.; Thieken, A.; Schüller, L.; Fleischmann, R. (2019): Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. Abschlussbericht. Texte 55/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (2019): Starkniederschläge Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft - Kurzbericht -. Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU); Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen; Deutscher Wetterdienst (DWD); Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG).
- KLIWA (2018): KLIWA-Kurzbericht. Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B. im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU); Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG).
- Kottmeier, C.; Biegert, C.; Corsmeier, U. (2007): Effects of Urban Land Use on Surface Temperature in Berlin: Case Study. *J. Urban Plann. Dev.* 133 (2), S. 128–137. doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(2007)133:2(128).
- Krähenmann, S.; Walter, A.; Brienens, S.; Imbery, F.; Matzarakis, A. (2018): High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany. *Theor Appl Climatol* 131 (3-4), S. 899–926. doi:10.1007/s00704-016-2003-7.
- Kreibich, H.; Bubeck, P.; Kunz, M.; Mahlke, H.; Parolai, S.; Khazai, B.; Daniell, J.; Lakes, T.; Schröter, K. (2014): A review of multiple natural hazards and risks in Germany. *Nat Hazards* 74 (3), S. 2279–2304. doi:10.1007/s11069-014-1265-6.
- Kreibich, H.; Müller, M.; Schröter, K.; Thieken, A. H. (2017): New insights into flood warning reception and emergency response by affected parties. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17 (12), S. 2075–2092. doi:10.5194/nhess-17-2075-2017.
- Kreibich, H.; Pech, I.; Schröter, K.; Müller, M.; Thieken, A. H. (2016): New insights into flood warning and emergency response from the perspective of affected parties. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* doi:10.5194/nhess-2016-133.
- Kühn, N.; Fischer, S.; Gillner, S.; Rohde, M.; Schmidt-Wiegand, A.; Selinger, A. (2017a): Zukunftsweisender Umgang mit der Gehölzvegetation historischer Gärten in Zeiten des Klimawandels. How to deal with wood vegetation of historic gardens under the conditions of climatic change in the future. In: D. Dujesiefken (Hrsg) *Jahrbuch der Baumpflege 2017. Yearbook of Arboriculture. – Jahrbuch der Baumpflege* 21. Braunschweig. 155-173.
- Kühn, N.; Gillner, S. (2017): Die Bedeutung ökologischer Prozesse für die Erhaltung historischer Gärten. In: N. Kühn, S. Gillner, A. Schmidt-Wiegand (Hrsg) *Gehölze in historischen Gärten im Klimawandel. Transdisziplinäre Ansätze zur Erhaltung eines Kulturguts. – Landschaftsentwicklung und Umweltforschung* 131.
- Kühn, N.; Gillner, S.; Schmidt-Wiegand, A. (Hrsg.) (2017b): *Gehölze in historischen Gärten im Klimawandel. Transdisziplinäre Ansätze zur Erhaltung eines Kulturguts.* Universitätsverlag der TU Berlin. doi:10.14279/DEPOSITONCE-6067.
- 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. (1997): Städtische Klimamodifikation. VDI Berichte (1330), S. 87–108.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2019): Stadtklima. Download unter <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaanpassung-in-nrw/stadtklima>. Stand: 07.08.2019.

Landeshauptstadt Hannover (Hrsg.) (2017): Leben mit dem Klimawandel – Hannover passt sich an. Anpassungsstrategie und Maßnahmenprogramm 2012 – 2016 K. Schriftenreihe kommunaler Umweltschutz 53, Hannover.

Landsberg, H. E. (1981): The Urban Climate. Academic Press, New York.

Leakey, A. D. B.; Ainsworth, E. A.; Bernacchi, C. J.; Rogers, A.; Long, S. P.; Ort, D. R. (2009): Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of experimental botany* 60 (10), S. 2859–2876. doi:10.1093/jxb/erp096.

Lienhoop, N.; Schröter-Schlaack, C. (2018): Ökosystemleistungen und deren Inwertsetzung in urbanen Räumen. BfN-Skripten 506. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Mathey, J.; Röbber, S.; Lehmann, I.; Bräuer, A.; Goldberg, V.; Kurbjuhn, C.; Westbeld, A. (2011): Noch wärmer, noch trockener? Stadtnatur und Freiraumstrukturen im Klimawandel. Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben (FKZ 3508 821 800) "Noch wärmer, noch trockener? Stadtnatur und Freiraumstrukturen im Klimawandel". Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

Mattanovich, E.; Bürger, G.; Fischer, M.; Neubauer, U.; Stebegg, K. (Hrsg.) (2017): Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte: ein Projekt des Forschungsprogramms "Experimenteller Wohnungs- und Städtebau (ExWoSt) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), betreut vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn.

Matzarakis, A. (2013): Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 73 (3), S. 115–118.

Matzarakis, A.; Zielo, B. (2017): Maßnahmen zur Reduzierung von Hitzebelastungen für Menschen - Bedeutung von Hitzeaktionsplänen. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 77 (7/8).

Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; Thieken, A. (2010): Review article "Assessment of economic flood damage". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10 (8), S. 1697–1724. doi:10.5194/nhess-10-1697-2010.

Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI) (Hrsg.) (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung, Stuttgart.

Mohajerani, A.; Bakaric, J.; Jeffrey-Bailey, T. (2017): The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of environmental management* 197, S. 522–538. doi:10.1016/j.jenvman.2017.03.095.

Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. (2017): Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 5/6 (188), S. 94–111. doi:10.23765/afjz0002006.

Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Munich RE) (Hrsg.) (2019): NatCatSERVICE. Flood / flash flood events in Germany 1980 – 2018. Download unter <https://natcatservice.munichre.com/>. Stand: 16.07.2019.

National Building Specification (NBS) (Hrsg.) (2014): Climate change adaptation in buildings. Download unter <https://www.thenbs.com/knowledge/climate-change-adaptation-in-buildings>.

Naturkapital Deutschland (TEEB-DE) (2018): Wert der Natur aufzeigen und Entscheidungen integrieren - eine Synthese. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig.

- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Hrsg.) (2018): Der Klimawandel und seine Folgen für die Wasserwirtschaft im Niedersächsischen Binnenland. Informationsdienst Gewässerkunde 1/2018, Norden.
- Oke, T. R. (2011): Urban heat island. In: I. Douglas (Hrsg.) Handbook of urban ecology. – Routledge handbooks. Abingdon, Oxon, England, New York. S. 120–131.
- Oleson, K. (2012): Contrasts between Urban and Rural Climate in CCSM4 CMIP5 Climate Change Scenarios. J. Climate 25 (5), S. 1390–1412. doi:10.1175/JCLI-D-11-00098.1.
- Peng, S.; Piao, S.; Ciais, P.; Friedlingstein, P.; Oettle, C.; Bréon, F.-M.; Nan, H.; Zhou, L.; Myneni, R. B. (2012): Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental science & technology 46 (2), S. 696–703. doi:10.1021/es2030438.
- Referat für Stadtplanung und Bauordnung München (Hrsg.) (2019): Gesetzesentwurf der Bayerischen Staatsregierung zum Flächensparen; Stellungnahme der Landeshauptstadt München. Download unter <https://www.rismuenchen.de/RII/RII/DOK/SITZUNGSVORLAGE/5644036.pdf>. Stand: 17.09.2020.
- Richter, M. (2016): Urban climate change-related effects on extreme heat events in Rostock, Germany. Urban Ecosyst 19 (2), S. 849–866. doi:10.1007/s11252-015-0508-y.
- Roloff, A.; Grundmann, B.; Korn, S. (2010): Trockenstress bei Stadtbäumen – Ursachen, Reaktionen, Konsequenzen für die Artenwahl. Forstwiss. Beiträge Tharandt (Beiheft 9), S. 63–81.
- Rözer, V.; Müller, M.; Bubeck, P.; Kienzler, S.; Thieken, A.; Pech, I.; Schröter, K.; Buchholz, O.; Kreibich, H. (2016): Coping with Pluvial Floods by Private Households. Water 8 (7), S. 304. doi:10.3390/w8070304.
- 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.
- Schmauck, S. (Hrsg.) (2019): Dach- und Fassadenbegrünung – neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen, Bonn-Bad Godesberg. doi:10.19217/skr538.
- Schönfeld, P. (2018): Klimabäume: welche Arten sind zukunftsfruchtig? Pro Baum 2018 (3), S. 2–7.
- Schönfeld, P. (2019): "Klimabäume" - welche Arten können in Zukunft gepflanzt werden? LWF aktuell 2019.
- Schröter, K.; Lüdtke, S.; Redweik, R.; Meier, J.; Bochow, M.; Ross, L.; Nagel, C.; Kreibich, H. (2018): Flood loss estimation using 3D city models and remote sensing data. Environmental Modelling & Software 105, S. 118–131. doi:10.1016/j.envsoft.2018.03.032.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (Hrsg.) (2016): Stadtentwicklungsplan Klima KONKRET. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt.
- Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B.; Leßmann, D.; Tils, R. von; Becker, C.; Hübner, S. (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 111/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Simbeni, R. (2009): Positionspapier zur Etablierung einer ökologischen Bauaufsicht bei Bauvorhaben an Fließgewässern, Ligist.
- Speak, A.; Zerbe, S. (2020): Zum Einfluss von Bäumen und Oberflächenbelag auf das Mikroklima innerstädtischer Freiflächen. Das Beispiel der Stadt Meran, Bozen (Südtirol, Italien). Naturschutz und Landschaftsplanung 52 (8), S. 378–384.
- Spekkers, M.; Rözer, V.; Thieken, A.; Veldhuis, M.-C. ten; Kreibich, H. (2017): A comparative survey of the impacts of extreme rainfall in two international case studies. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 17 (8), S. 1337–1355. doi:10.5194/nhess-17-1337-2017.
- Sprondel, N. F.; Donner, J.; Köppel, J. (2016): Klimaanpassung im Bebauungsplan. Eignung von Bayesian Networks zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer Implementierung von Maßnahmen. Naturschutz und Landschaftsplanung 48 (10), S. 321–327.

- Stadt Jena (2016): Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel. Stadtbaumkonzept.
- Stadt Nürnberg (2014): Stadtklimagutachten. Analyse der klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet von Nürnberg.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018): Statistisches Jahrbuch 2018. Transport und Verkehr. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Stock, B. (2015): BBSR-Analysen KOMPAKT 2/2015. Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden 2/2015. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn.
- 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.
- Susca, T.; Gaffin, S. R.; Dell'osso, G. R. (2011): Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environmental pollution* (Barking, Essex : 1987) 159 (8-9), S. 2119–2126. doi:10.1016/j.envpol.2011.03.007.
- Swamy, G.; Nagendra, S. M. S.; Schlink, U. (2017): Urban heat island (UHI) influence on secondary pollutant formation in a tropical humid environment. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995) 67 (10), S. 1080–1091. doi:10.1080/10962247.2017.1325417.
- Technische Universität München (TUM) (Hrsg.) (2019): City Trees II - Urban Trees under Climate Change: Growth, Ecosystem Services and Perspectives. Download unter <https://www.zsk.tum.de/index.php?id=http-waldwachstumwzwtumde1&L=0&I=1>.
- Thieken, A. H.; Kienzler, S.; Kreibich, H.; Kuhlicke, C.; Kunz, M.; Mühr, B.; Müller, M.; Otto, A.; Petrow, T.; Pisi, S.; Schröter, K. (2016): Review of the flood risk management system in Germany after the major flood in 2013. *E&S* 21 (2). doi:10.5751/ES-08547-210251.
- Thomsen, S. L.; Vogt, D.; Brausewetter, L. (2019): Wohnungsmarkt und Wohnungspolitik in Deutschland: Situation und Optionen. Working Paper. IZA Standpunkte 97. Institute of Labor Economics (IZA).
- 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) (Hrsg.) (2016): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019a): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftqualität in Innenräumen. Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene (IRK) am Umweltbundesamt. *Bundesgesundheitsblatt* 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.
- VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) (2020): KRdL - Tätigkeitsbericht 2019.
- VDI 3787 Blatt 8: Umweltmeteorologie - Stadtentwicklung im Klimawandel. Ursprünglich gefasst.
- VV Städtebauförderung 2020: Verwaltungsvereinbarung über die Gewährung von Finanzhilfen des Bundes an die Länder nach Artikel 104b des Grundgesetzes zur Förderung städtebaulicher Maßnahmen (in BAnz AT 25.06.2020 B1. Ursprünglich gefasst 15.5.2020).
- Wagenaar, D.; Lütke, S.; Schröter, K.; Bouwer, L. M.; Kreibich, H. (2018): Regional and Temporal Transferability of Multivariable Flood Damage Models. *Water Resour. Res.* 54 (5), S. 3688–3703. doi:10.1029/2017WR022233.

- Wagner, P.; Kuttler, W. (2014): Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere--a case study in Essen, Germany. *The Science of the total environment* 475, S. 104–115. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.026.
- Ward, K.; Lauf, S.; Kleinschmit, B.; Endlicher, W. (2016): Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *The Science of the total environment* 569-570, S. 527–539. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.119.
- WBGU (2016): Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Berlin.
- Weidlich, S. (2019): Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Rechtliche Steuerung bei unseren Wissensgrundlagen. Kassel University Press, Kassel. doi:10.19211/KUP8783737607971.
- Weingraber, F.; Schindelegger, A. (2018): Konfliktfeld Absiedelung von Hochwasserrisikogebieten: Grundlagen und Governance-Prozesse am Beispiel des Eferdinger Beckens (OÖ). In: A. Kanonier, F. Rudolf-Miklau (Hrsg) *Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis*. Handbuch. S. 491–505.
- Weller, B.; Fahrion, M.-S.; Horn, S.; Naumann, T.; Nikolowski, J. N. (2016): *Baukonstruktion im Klimawandel*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Welp, M.; Gebauer, J.; Lotz, W.; Wurbs, S. (2010): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Versicherungen.
- WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 2009 (in http://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/). Ursprünglich gefasst 2009.
- Wienert, U.; Walter, A. (2011): Klimawandel und Bauen. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg) *Klimastatusbericht 2011*. Offenbach. S. 5–16.
- Winker, N. (2004): Sommerliche Belastungen von Bauarbeitern durch UV-Strahlung und Ozon. Ursachen, Folgen und empfehlenswerte Schutzmaßnahmen. Download unter <https://www.imabe.org/index.php?id=479>.
- World Meteorological Organization (WMO) (Hrsg.) (1996): *Climate and Urban Development*, Genf.
- Wrede, A. (2016): Klimatolerante Bäume für den Norden an vier Standorten in Schleswig-Holstein erprobt. *Pro Baum* 2016 (4), S. 11–13.
- 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.
- Zhou, B.; Rybski, D.; Kropp, J. P. (2017): The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific reports* 7 (1), S. 4791. doi:10.1038/s41598-017-04242-2.
- Zomorodian, Z. S.; Tahsildoost, M.; Hafezi, M. (2016): Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, S. 895–906. doi:10.1016/j.rser.2016.01.033.
- ZTV-Vegtra-Mü: Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten vom 2016. Ursprünglich gefasst 15.07.2016.

3 Handlungsfeld Energiewirtschaft

Autoren: Maïke Voß, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin

3.1 Ausgangslage

3.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Der Sektor der Energiewirtschaft gliedert sich anhand der Wertschöpfungskette in Exploration von Primärenergieträgern, Umwandlung, Transport und Energieversorgung. Für die Energieerzeugung werden Primärenergieträger durch verschiedene Prozesse in nutzbare Energie wie Strom oder Wärme umgewandelt. Dabei lassen sich die Energieträger in fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas und in erneuerbare Energieträger wie Sonnen- oder Windenergie sowie in die Kernenergie kategorisieren. Nach der Energieerzeugung folgt die Übertragung zum Endverbraucher.

Die Energiewirtschaft in Deutschland hat in den letzten Jahren, insbesondere durch den Ausbau erneuerbarer Energieträger, einen deutlichen Wandel erlebt. An der Stromerzeugung hatten die erneuerbaren Energien 2018 einen Anteil von 34,9 Prozent. Der größte Anteil hierbei entfiel auf die Windkraft mit 17,3 Prozent. Weitere wichtige Energieträger sind Braunkohle mit einem Anteil von 22,5 Prozent sowie Steinkohle und Erdgas mit jeweils 12,9 Prozent (BMWi 2019b). Im Wärmesektor liegt der Anteil erneuerbarer Energien bei 13,9 Prozent, im Verkehrssektor bei 5,6 Prozent; er ist damit für beide Sektoren in den vergangenen Jahren stabil geblieben (UBA 2019a). Der Primärenergieverbrauch in Deutschland teilte sich 2018 in folgende Energieträger auf: Mineralöl stellt mit einem Anteil von 34 Prozent den wichtigsten Energieträger dar, Erdgas lag mit 23,4 Prozent vor den erneuerbaren Energien (13,8 Prozent) sowie Steinkohle (10,9 Prozent) und Braunkohle (11,3 Prozent). Der Anteil der Kernenergie betrug 6,3 Prozent (BMWi 2019b).

Rund zwei Drittel (69,5 Prozent) des Energieverbrauchs privater Haushalte in Deutschland entfielen in 2016 auf die Raumwärme. Eine Betrachtung aller Sektoren zeigt, dass der Verbrauch von Wärme nach dem Verbrauch mechanischer Energie einer der größten Endenergieverbraucher in 2016 war. Verbesserte energetische Zustände durch Sanierungen und effizientere Heizungen in Gebäuden haben den Wärmeverbrauch im Vergleich zu 2008 um 7,8 Prozent reduziert, obwohl die Wohnfläche um 4,9 Prozent gestiegen ist (BMWi 2018a). Die Steigerung der Energieeffizienz konnte den Primärenergieverbrauch in 2017 gegenüber 2008 um knapp sechs Prozent senken. Trotzdem wird angenommen, dass die Nachfrage nach Energie zukünftig sowohl aufgrund des Bevölkerungs- als auch des Wirtschaftswachstums steigen wird.

Neben der steigenden Energienachfrage ergeben sich auch aus dem Klimawandel, insbesondere durch die Folgen extremer Wetterereignisse, steigender Temperaturen und veränderter Niederschlagsmuster, Herausforderungen für die Energiewirtschaft (WEC 2015). Bereits in der Vergangenheit waren Auswirkungen auf den Energiesektor durch veränderte klimatische Bedingungen zu verzeichnen. Einschränkungen in der Energieerzeugung in Kraftwerken aufgrund von temporärem Kühlwassermangel, bedingt durch hohe Wassertemperaturen in den Sommermonaten der letzten Jahre, sowie die blockierte Gasversorgung infolge des Hochwasserereignisses an der Elbe im Jahr 2002, sind nur zwei Beispiele dafür (Gas- und Umwelttechnik GmbH 2003).

Die Folgen des Klimawandels können so zu Beeinträchtigungen der Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft führen. Aufgrund der hohen Relevanz des Handlungsfeldes für verschiedene Abläufe der Wirtschaft und des gesellschaftlichen Lebens, ergeben sich nachgelagerte Folgen für

unterschiedliche Handlungsfelder. So bestehen unter anderen Querverbindungen zu den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Bauwesen“ und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“.

3.1.2 Neuere Entwicklungen

Das Zusammenspiel politischer Maßnahmen, technischer Entwicklungen und sozioökonomischer Prozesse beeinflusst den Energiesektor maßgeblich. Eine zentrale Veränderung besteht in dem Ausbau erneuerbarer Energien, welcher auf politischer Ebene durch umfangreiche Förderungen vorangetrieben wird. Gleichzeitig wird bis 2022 der Ausstieg aus der Kernkraft vollzogen und es ist vorgesehen, bis zum Jahr 2038 die Energieerzeugung aus Braun- und Steinkohle einzustellen (BMWi 2017; BMWi 2019d). Ein weiterer massiver Ausbau der erneuerbaren Energien ist somit notwendig. Diese Entwicklungen führen zu neuen Herausforderungen in der Energiewirtschaft, insbesondere beim Ausbau der Übertragungs- und Versorgungsnetze sowie der Sektorkopplung.

Der umfangreiche Netzausbau ist zum Gelingen der Energiewende unumgänglich. Um den in Offshore-Windparks produzierten Strom im Norden Deutschlands in die im Süden des Landes gelegenen Gebiete mit einem besonders hohen Energiebedarf zu transportieren, ist der Ausbau großer Übertragungsleitungen erforderlich (BNetzA 2014; BNetzA 2015). Diese Übertragungsnetze werden teilweise überirdisch verlaufen und damit klimatischen Veränderungen ausgesetzt sein.

Eine weitere grundlegende Veränderung der Energiewirtschaft in den kommenden Jahrzehnten wird im Ausbau der Sektorkopplung bestehen. Beispiele für Technologien der Sektorkopplung sind Power-to-X Systeme, bei denen Strom in synthetische Kraftstoffe wie Gas oder in Wärme und Kälte umgewandelt wird (Fraunhofer ISI 2018). Für die Steuerung der Sektorenkopplung ist ein weiterer technologischer Ausbau, zum Beispiel durch die Einführung von Energiespeichern, erforderlich, mit denen zudem besser auf Schwankungen im Energieangebot eingegangen werden kann (Fraunhofer ISI 2018; BDEW 2019).

Die künftigen Auswirkungen des Klimawandels auf das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ müssen daher unter Berücksichtigung der genannten Entwicklungen gesehen werden. Entlang der Wertschöpfungskette können verschiedene Auswirkungen und Einschränkungen bis zum Ende des Jahrhunderts betrachtet werden. Beispielsweise kann Kühlwasser für thermische Kraftwerke, welches hauptsächlich aus Flüssen entnommen wird, bei vermehrten Auftreten von Hitze und Trockenheit und dadurch sinkenden Wasserständen und steigenden Wassertemperaturen, nur eingeschränkt genutzt werden (Zhou et al. 2013; UBA 2015; Zhou et al. 2018). Gleichzeitig wird durch den Ausstieg aus der Atom- und Kohleenergie der Bedarf an Kühlwasser deutlich abnehmen.

Erneuerbare Energien werden durch Wetterphänomene beeinflusst. Beispielsweise können Hitzeperioden zur Erwärmung von Leiterseilen führen, die deren Übertragungskapazität reduzieren (Kurth und Breuer 2018). Des Weiteren sind Auswirkungen in der regenerativen Energieerzeugung zu erwarten. Projektionen einer zukünftig reduzierter kurzweilliger UV-Strahlung gehen dabei beispielsweise von einer sinkenden Energieerzeugung durch Photovoltaikanlagen aus (Jerez et al. 2015).

Parallel dazu wirkt sich der Klimawandel auf den Energiebedarf aus. Durch steigende Temperaturen kann sich der Bedarf an Wärmeenergie reduzieren (Andrić et al. 2017), wobei gleichzeitig ein steigender Bedarf an Gebäudekühlung erwartet werden kann (Bürger et al. 2017; Koch et al. 2017).

Auch der Monitoringbericht weist auf die Folgen der Energiewende und der zunehmenden Diversifizierung der Energieträger hin. Er verdeutlicht, dass das deutsche Stromnetz eine hohe Stabilität aufweist und wetterbedingte Unterbrechungen und Nichtverfügbarkeiten der Stromversorgung bisher nur selten auftreten (UBA 2015; UBA 2019b).

3.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Die Wirkungsketten im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ beziehen sich insbesondere auf die Energieversorgung und den Energiebedarf. Auswirkungen auf die Energieversorgung und Energieumwandlung resultieren vor allem aus den Änderungen von Windgeschwindigkeiten, Niederschlägen, Temperaturen und Sonnenscheindauern.

Veränderungen beim Energiebedarf werden sich dadurch ergeben, dass steigende Temperaturen zukünftig zwar zu einer Senkung des Wärmebedarfs, aber auch zu einem Anstieg des Bedarfs an Gebäudekühlung führen werden. Demnach wurde die Klimawirkung „Bedarf an Kühlenergie“, die durch steigende Durchschnittstemperaturen sowie durch Hitze und erhöhte Luftfeuchtigkeit beeinflusst wird, als besonders relevant eingestuft. In den folgenden Ausführungen wird der Bedarf an Kühlenergie daher intensiver betrachtet.

Tabelle 30: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Bedarf an Kühlenergie	Intensive Bearbeitung
Bedarf an Heizenergie	Extensive Bearbeitung
Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger	Extensive Bearbeitung
Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke	Extensive Bearbeitung
Ertragsminderung/-zunahme bei Photovoltaikanlagen und Windenergieanlagen an Land und auf See	Extensive Bearbeitung
Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung	Extensive Bearbeitung
Ertragsminderung bei thermischen Kraftwerken	Nicht ausgewählt
Ertragsminderung bei Wasserkraftwerken	Nicht ausgewählt
Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen	Nicht ausgewählt
Kapazitätsverlust von Freilandleitungen und Erdkabeln	Nicht ausgewählt
Leitungsüberlastungen und Spannungsbandverletzungen	Nicht ausgewählt
Schäden an Leitungsnetzen	Nicht ausgewählt
Schäden an Umspannanlagen	Nicht ausgewählt
Ertragsausfälle in der Biomasseproduktion	Nicht ausgewählt

3.2 Klimawirkungen im Detail

3.2.1 Bedarf an Kühlenergie

Die durch den Klimawandel zu erwartenden steigenden Temperaturen führen zu einem erhöhten Bedarf an Gebäudekühlung. Dies kann dazu beitragen, dass sich auch der Kühlenergieaufwand erhöht. Dabei wird insbesondere die Energienachfrage für die Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden betrachtet. Davon unberücksichtigt bleibt die Energienachfrage zur Kühlung von Produktionsprozessen in der Industrie, auf die im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ genauer eingegangen wird. Die Energienachfrage für die Klimatisierung von Gebäuden bezieht sich ausschließlich auf den Energieträger Strom.

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Gebäudekühlung gewinnt durch die Zunahme der Temperaturen infolge des Klimawandels wachsende Beliebtheit (Bettgenhäuser et al. 2011). Sowohl aktive als auch passive Kühlungsmaßnahmen sind dabei künftig relevant. Während aktive Kühlsysteme wie Klimaanlage zum Energieverbrauch beitragen, bieten passive Kühlmaßnahmen wie Lüftungskühlung oder Sonnenschutzsysteme Energieeinsparpotenziale (Brunner et al. 2007; Bettgenhäuser et al. 2011; Bürger et al. 2017). Neben der Kühlungsmaßnahme beeinflusst der Gebäudetyp die benötigte Kühlenergie und die Effizienz von Kühlsystemen. Grundsätzlich ist zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden zu unterscheiden (Bürger et al. 2017). Im Bereich der Nichtwohngebäude kann aufgrund interner Lasten wie Bürogeräten, Personen und Beleuchtung mit einem höheren Kühlenergiebedarf gerechnet werden (Bettgenhäuser et al. 2011). Weitere wichtige Faktoren, die sich auf den Bedarf an Kühlenergie auswirken, sind etwa Gebäudealter, Dämmungsstandard, Sanierungsgrad, Beschattungsgrad, Fassadenbegrünung oder Nutzungstyp des Gebäudes (Bürger et al. 2017; Sieker et al. 2019).

Vor allem der Sommer ist in Deutschland geprägt von zeitweise hohen Außentemperaturen. Stärkere Wärmebelastungen können mit gesundheitlichen Risiken einhergehen und auch die physische und kognitive Leistungsfähigkeit beeinträchtigen (Bunz 2016). Um auch während Hitzeperioden ein angenehmes und gesundheitsförderndes Innenraumklima zu erreichen, werden Maßnahmen der aktiven und passiven Gebäudekühlung empfohlen (Mücke und Matzarakis 2019). Auf die gesundheitlichen Aspekte von Hitze wird bei der Betrachtung der Klimawirkung „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ und auf weitere gesundheitliche Aspekte der Gebäudeklimatisierung bei der Betrachtung der Klimawirkung „Innenraumklima“ im Handlungsfeld „Bauwesen“ eingegangen.

Der Energieverbrauch für die Raumkühlung wird zusammen mit der Raumwärme und der Warmwasserbereitung als gebäuderelevanter Endenergieverbrauch ausgewiesen (BMWi 2015b). Im Zeitraum von 2008 bis 2016 wurde bei der Raumkühlung ein Anstieg des gebäuderelevanten Endenergieverbrauchs von knapp 36 Prozent beobachtet (BMWi 2018a). Da sich der gebäuderelevante Endenergiebedarf für Raumkühlung dennoch mit 0,1 Prozent (36 Petajoule) auf niedrigem Niveau befindet, stellt dieser bisher keine wesentliche Verbrauchseinheit dar (BMWi 2018a).

Die Ergebnisse verschiedener Forschungsvorhaben zur zukünftigen Entwicklung des Kühlenergiebedarfs und Maßnahmen zur klimaneutralen Kühlung zeigen, dass der Energiebedarf verschiedener Kühlsysteme stark variiert und, dass sich im Bereich der Gebäudeklimatisierung erhebliche Energieeinsparpotenziale durch passive Kühlungsmaßnahmen wie Nachtlüftung ergeben (Heinrich et al. 2014; Koch et al. 2017). Effiziente Nachtlüftung wird jedoch nur bei Gebäuden erreicht, welche durch die Bauweise ausreichende Luftströme für die Belüftung zulassen

(Schettler-Köhler et al. 2007). Bestimmte Wohngebäude unterliegen zudem auch Einschränkungen bei der Installation von Klimaanlage, sodass selbst bei steigenden Temperaturen eine Kühlung durch aktive Kühlmaßnahmen nicht erfolgen kann. Mit fortschreitendem Klimawandel und damit steigenden Temperaturen kann gleichwohl ein zunehmender Bedarf an Gebäudekühlung und eine Zunahme der Anzahl der Haushalte mit Klimageräten erwartet werden, was den benötigten Energiebedarf zur Kühlung erhöhen könnte (Brunner et al. 2007; Santamouris 2014; Santamouris et al. 2015; Bürger et al. 2017; Koch et al. 2017).

Repenning et al. (2018) erwarten einen Anstieg der Anzahl an Klimageräten für Deutschland von über einer Millionen Geräte im Jahr 2010 auf über sieben Millionen Geräte in 2035. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass trotz einer steigenden Effizienz der Klimageräte um etwa 20 Prozent bis 2035, der entsprechende Stromverbrauch der privaten Haushalte sich aufgrund der wachsenden Anzahl der Geräte von knapp 0,8 Terrawattstunden in 2010 auf bis zu 3,6 Terrawattstunden erhöhen kann (Repenning et al. 2018). Dieser Trend wird durch eine Projektion des Endenergiebedarfs der Wohngebäudekühlung bestätigt, welche auf Szenarien der Entwicklung des Gebäudebestands und des zukünftigen Klimawandels basiert. Dabei wurde auf Grundlage der Berechnung zweier Szenarien – zum einen mit einem hohen Klimatisierungsbedarf, durch geringe Sanierungsaktivitäten und niedrige energetische Standards, und zum anderen mit einem geringen Klimatisierungsbedarf, durch höhere Sanierungsaktivitäten und stärkere energetische Standards, für 2050 projiziert, dass die Gebäudeklimatisierung drei bis sechs Prozent des Stromverbrauchs privater Haushalte ausmachen wird. Je nach Annahmen zur Gebäudesanierung ergibt sich hier eine Zunahme von 1,3 Terrawattstunden im Jahr 2016 auf 2,1 Terrawattstunden bis 5,3 Terrawattstunden im Jahr 2050 (AGEB 2014; Koch et al. 2017). Bürger et al. gehen in ihrer Analyse von einem zusätzlichen jährlichen Strombedarf privater Haushalte von 0,7 bis 1,7 Terrawattstunden bis 2050 aus (Bürger et al. 2017). Auf Basis von Klimaprojektionen, die von einem Temperaturanstieg von zwei Grad Celsius bis zur Mitte des Jahrhunderts und etwa 3,5 Grad Celsius bis zum Ende des Jahrhunderts ausgehen, kommen Hermann et al. zu dem Ergebnis, dass eine Zunahme des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden (Wohn- und Nichtwohngebäude) bis 2035 um etwa 50 Prozent und bis 2085 um etwa 90 Prozent zu erwarten ist (Hermann et al. 2016). Bei Nichtwohngebäuden wird ein Anstieg von bis zu 25 Prozent bis 2030 erwartet (Bettgenhäuser et al. 2011). Dabei zeigt sich der höchste Kühlenergiebedarf für hochverglaste Altbau-Bürogebäude mit Vollklimatisierung. Der im Vergleich zu Wohngebäuden geringere Anstieg des Kühlenergiebedarfs für Nichtwohngebäude kann auf die Annahme zukünftig besser gedämmter Gebäude mit geringerem Kühlbedarf zurückzuführen sein (Bürger et al. 2017).

Insgesamt verdeutlichen die starken Spannbreiten der genannten Projektionen die hohen Unsicherheiten, die mit der Ermittlung des zukünftigen Kühlenergiebedarfs zusammenhängen.

Engpässe in der Energiebereitstellung in Deutschland können auf Basis der genannten Projektionen ausgeschlossen werden. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass die Zunahme des Klimatisierungsbedarfs für sich zwar auffällig ist, jedoch in der Gesamtbetrachtung des Strombedarfs immer noch eine kleine Verbrauchseinheit darstellt.

Grundlage der Operationalisierung

Um aus den erwarteten Entwicklungen klimatischer Einflüsse eine Aussage zum zukünftigen Bedarf nach Kühlenergie abzuleiten, wurde der Indikator Kühlgradtage pro Jahr (Cooling Degree Days – CDD_[2]) (*Indikatoren-ID: EW-KL-01*¹⁸) verwendet. Ein Kühlgradtag wird definiert als die Abweichung in Grad Celsius von einer Referenztemperatur (Spinoni et al. 2015). Dabei wird die

¹⁸ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

Anzahl an Temperaturgraden aufsummiert, an denen die Referenztemperatur überschritten wird und mit der Einheit „Kelvin mal Tag [$K \cdot Tag$]“ angegeben. Der Wert trifft somit keine Aussage zu der Anzahl an Tagen, an denen gekühlt werden muss (UM 2015). Es können vielmehr Annahmen über den Energiebedarf für Kühlung getroffen werden (EEA 2016). Grundlage für die Berechnung sind Ensembles von regionalen Klimaprojektionen, basierend auf den RCP-Emissionsszenarien des Weltklimarats IPCC. Die Berechnung erfolgte nach Spinoni et al. gemäß Empfehlungen der Europäischen Umweltagentur (Spinoni et al. 2013; Spinoni et al. 2015; EEA 2016). Als Referenztemperatur, ab der Gebäude gekühlt werden, wurden 22 Grad Celsius als durchschnittliche mittlere Tagestemperatur ausgewählt (Olonscheck et al. 2011; Spinoni et al. 2018). Dabei handelt es sich um eine eher pessimistische Annahme, da in den meisten Innenräumen durch eine gute Durchlüftung auch bei höheren Außentemperaturen noch eine Innenraumtemperatur von 22 Grad Celsius erreicht werden kann. Der Indikator gibt einen Trend an und kann Hinweise auf zukünftige Entwicklungen des Energiebedarfs für Kühlung geben. Vor dem Hintergrund der oben genannten Einschränkungen sowie dem Einfluss weiterer Faktoren (Gebäudetyp, Energiepreise, verhaltensbedingten Aspekten) können die Ergebnisse projizierter Kühlgradtage nur bedingt den zukünftigen Kühlenergiebedarf abbilden; sie unterliegen hohen Unsicherheiten (EEA 2016).

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

Für den Bezugszeitraum lassen sich für den größten Teil Deutschlands Werte im Bereich von null bis hundert Kühlgradtagen feststellen. Lediglich für den Oberrheingraben, einer der wärmsten Regionen Deutschlands, ist eine höhere Anzahl von einhundert bis zweihundert Kühlgradtagen zu erkennen (Abbildung 7).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für die Mitte des Jahrhunderts zeigen die Projektionen sowohl im optimistischen (15. Perzentil des RCP8.5) wie auch im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) eine Zunahme der Kühlgradtage. Im optimistischen Fall erhöht sich die Anzahl der Kühlgradtage von einhundert auf zweihundert für große Teile Brandenburgs und Sachsen-Anhalts sowie im nördlichen Sachsen (Abbildung 7). Im Süden Deutschlands kann dieselbe Zunahme für Regionen in Ober- und Niederbayern und Unter- und Mittelfranken beobachtet werden. In Baden-Württemberg betrifft dies die Oberrheinregion und die Region Stuttgart und Nordbaden. Weiterhin kann von einem Anstieg auf bis zu zweihundert Kühlgradtage im südlichen Hessen, südöstlichen Rheinland-Pfalz, große Teile des Saarlands sowie das Rheinland ausgegangen werden.

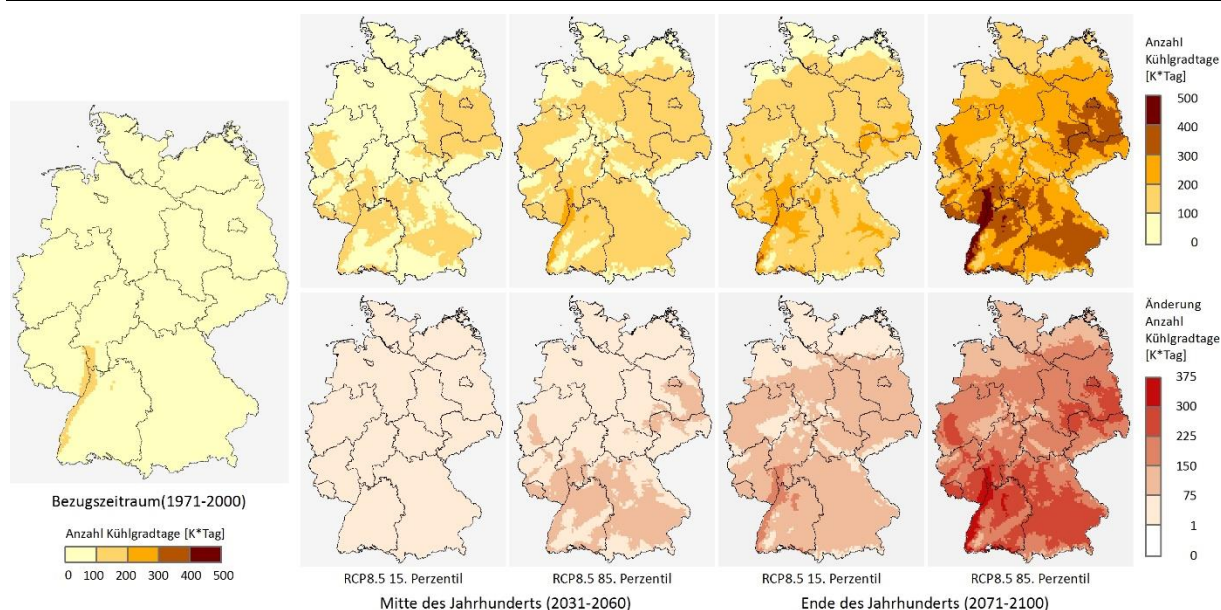
Im pessimistischen Fall breitet sich der Anstieg auf bis zu zweihundert Kühlgradtage für weite Teile Deutschlands aus. Nur für Norddeutschland und in Höhenlagen wird eine geringere Anzahl an Kühlgradtagen erwartet. Am Oberrheingraben steigt die Anzahl auf bis zu dreihundert Kühlgradtage.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Auch für das Ende des Jahrhunderts wird mit einem Anstieg der Anzahl der Kühlgradtage für beide Fälle gerechnet. Im optimistischen Fall steigt die Anzahl der Kühlgradtage für viele Regionen Deutschlands bis auf Norddeutschland und einzelne Höhenlagen auf einhundert bis zweihundert Kühlgradtage (Abbildung 7). Für den Oberrheingraben, Nordbaden, Südhessen und das südöstliche Rheinland-Pfalz wird eine Erhöhung auf zweihundert bis dreihundert Kühlgradtage erwartet. Eine solche Zunahme lässt sich auch in Regionen Niederbayerns und Unterfrankens und im Dreiländereck Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg feststellen.

Für den pessimistischen Fall ist eine starke Zunahme der Anzahl der Kühlgradtage zu beobachten. Dies betrifft besonders den Oberrheingraben, für den für das Ende des Jahrhunderts bis zu fünfhundert Kühlgradtagen zu erwarten sind. Dreihundert bis vierhundert Kühlgradtage werden für Niederbayern, große Teile Unterfrankens, Nordbaden, Südhessen, das südöstliche Rheinland-Pfalz, das Saarland und das Rheinland erwartet. Auch in der Bodenseeregion und im Länderdreieck Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg werden bis zu vierhundert Kühlgradtage projiziert. Die größte Änderungstendenz zeigt die Region des Oberrheingrabens auf. Für das Ende des Jahrhunderts kann sich dort die Anzahl an Kühlgradtagen vervierfachen. Dies kann somit auf einen zukünftigen Anstieg des Kühlenergiebedarfs hinweisen.

Abbildung 7: Kühlgradtage (CDD_[2]) in Kelvin mal Tag [K*Tag], mittlere Jahres- und Änderungs- werte, gemittelt für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts



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 jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 31: „Bedarf an Kühlenergie“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Kernaussagen zu „Bedarf an Kühlenergie“

- Sowohl für die Mitte als auch für das Ende des Jahrhunderts kann von einem steigenden Bedarf an Kühlenergie ausgegangen werden. Da neben der Temperatur noch weitere Faktoren (zum Beispiel Gebäudetyp, Energiepreise, verhaltensbedingte Aspekte) den Kühlbedarf beeinflussen unterliegen die Projektionen hohen Unsicherheiten.
- Die Zunahme des Klimatisierungsbedarfs ist zwar auffällig, aber nur eine kleine Verbrauchseinheit des Gesamtenergieverbrauchs. Es wird erwartet, dass es zukünftig selbst bei erhöhtem Bedarf an Kühlenergie dadurch nicht zu Stromdefiziten kommen wird.
- Der Indikator Kühlgradtage gibt Hinweise auf die zukünftige Entwicklung des Kühlbedarfs und projiziert für die Mitte des Jahrhunderts eine Zunahme der Kühlgradtage (in Kelvin*Tag) auf bis zu dreihundert Kühlgradtage im pessimistischen Fall. Hohe Änderungen sind vor allem in Süddeutschland zu beobachten.
- Für das Ende des Jahrhunderts können besonders am Oberrheingraben bis zu fünfhundert Kühlgradtage erwartet werden. Bis auf Norddeutschland steigen auch im Rest Deutschlands die Anzahl auf zweihundert bis vierhundert Kühlgradtage.

3.2.2 Bedarf an Heizenergie

Hintergrund und Stand der Forschung

Heizenergie bezeichnet den Energieverbrauch, welcher für Raumwärme in Wohn- und Nichtwohngebäuden aufgewandt wird. In privaten Haushalten sowie im Gewerbe-, Handel und Dienstleistungssektor wird Heizenergie hauptsächlich durch den Energieträger Erdgas erzeugt (BMU 2017). Wärme aus erneuerbaren Energiequellen spielt in Deutschland eine vergleichsweise geringe Rolle. Diese wird größtenteils aus fester Biomasse - vornehmlich Holz – erzeugt, wobei auch die Nutzung von Biogas zunehmend an Relevanz gewinnt. 2018 betrug der Anteil von Biomasse unter den Wärmequellen aus erneuerbaren Energien 86 Prozent des Endenergieverbrauchs (BMW i und AGEE-Stat 2019). Die geplante stärkere Sektorkopplung im Rahmen der Energiewende zeigt Potenziale für die Verwendung erneuerbarer Energien im Wärmesektor auf (BMU 2019a).

Der Wärmeverbrauch in Gebäuden ist in den letzten Jahren stetig gesunken (BMW i 2015a). So reduzierte sich der Endenergieverbrauch privater Haushalte für Raumwärme in 2016 um 9,2 Prozent im Vergleich zu 2008. Auch im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen wurde eine Abnahme des Endenergieverbrauchs für Raumwärme festgestellt (BMW i 2018a). Ursächlich sind hierfür verschiedene Faktoren, unter anderem veränderte Gebäudebestände und eine höhere Energieeffizienz. Aktuelle Maßnahmen zur Umsetzung der Energieeffizienzstrategie 2050 und des Klimaschutzplans der Bundesregierung zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestands tragen weiterhin zum abnehmenden Heizenergieverbrauch bei (BMW i 2015c).

Der energetische Zustand der Gebäude ist ein wichtiger Einflussfaktor für den Bedarf an Heizenergie. Zu einer deutlichen Reduzierung des Heizenergiebedarfs in Bestandsgebäuden führen unter anderem die energetische Sanierung mit einer Wärmedämmung von Fassade und Dach, ein Austausch der Fenster und dem Einbau einer effizienteren Heizungsanlage oder Sonnenkollektoren.

Klimatische Schwankungen haben erhebliche Auswirkungen auf den Bedarf an Heizenergie. Die wichtigsten klimatischen Einflussfaktoren zur Bestimmung des Heizbedarfs sind Temperaturveränderungen und das Auftreten von Kälteperioden.

Die Bestimmung des zukünftigen Bedarfs an Heizenergie wurde in verschiedenen Forschungsvorhaben aufgegriffen. So zeigt beispielsweise ein Vorhaben des Umweltbundesamts zum klimaneutralen Gebäudebestand 2050, dass die Auswirkungen des Klimawandels zu Reduktionen im Endenergiebedarf an Heizenergie führen können (Bürger et al. 2017). Auch verschiedene KLIMZUG Modellprojekte in den Regionen Dresden, Oldenburg und Freiburg projizieren für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts eine Abnahme des Heizenergiebedarfs (Bernhofer et al. 2011; Gößling-Reisemann et al. 2012; Schuchardt und Wittig 2012).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

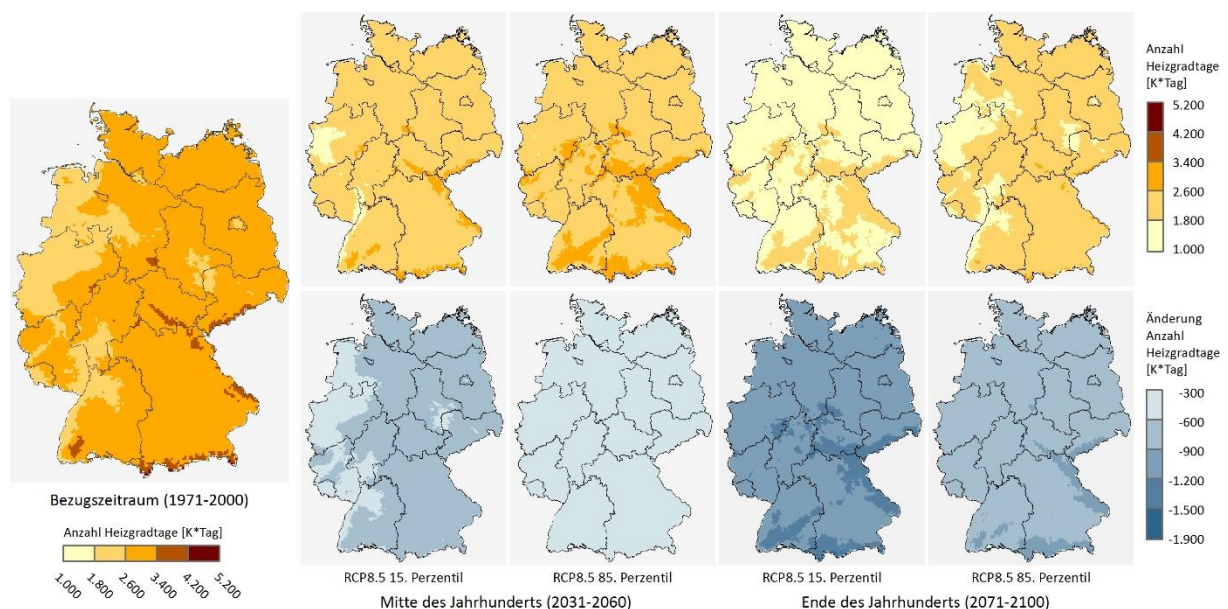
Für die Ermittlung des zukünftigen Bedarfs an Heizenergie kann der Indikator Heizgradtage (Heating Degree Days – HDD) (*Indikatoren-ID: EW-KL-02*¹⁹) verwendet werden. Heizgradtage bezeichnen die Anzahl an Temperaturgraden, an denen eine Referenztemperatur unterschritten wird (Albrecht et al. 2011). Diese Anzahl wird über das Jahr aufsummiert und mit der Einheit Kelvin mal Tag [$K \cdot Tag$] angegeben. Der Wert trifft somit keine Aussage zu der Anzahl an Tagen im Jahr, an denen geheizt werden muss (UM 2015). Es können jedoch Annahmen zum Heizenergie-

¹⁹ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

giebedarf abgeleitet werden. Als Referenztemperatur, unter der ein Heizbedarf in Gebäuden besteht, wurde gemäß Empfehlungen der Europäischen Umweltagentur 15,5 Grad Celsius als durchschnittliche mittlere Tagestemperatur ausgewählt (EEA 2016; Spinoni et al. 2018).

Abbildung 8 zeigt Projektionen der Heizgradtage für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000), die Mitte (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) für das RCP8.5-Szenario. Dabei stellt ein Fall den oberen Wertebereich der Projektion dar (85. Perzentil des RCP8.5), für den eine höhere Anzahl an Heizgradtagen projiziert wird. Der andere Fall (15. Perzentil des RCP8.5) stellt den unteren Wertebereich und somit eine stärkere Verringerung der Anzahl der jährlichen Heizgradtage dar. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl für die Mitte wie auch für das Ende des Jahrhunderts mit einer Abnahme der jährlichen Anzahl an Heizgradtagen zu rechnen ist. Für die Mitte des Jahrhunderts kann sich die Anzahl von bis zu 5.200 Heizgradtagen jährlich im Bezugszeitraum auf bis zu 3.400 Heizgradtage in den Höhenlagen und bis auf 1.000 Heizgradtage im Rheinland reduzieren. Bis zum Ende des Jahrhunderts kann, mit Ausnahme der Höhenlagen, eine Abnahme auf bis zu 1.000 Heizgradtage erwartet werden.

Abbildung 8: Heizgradtage (HDD) in Kelvin mal Tag [K*Tag], mittlere Jahres- und Änderungswerte, gemittelt für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts



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 jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Unter der Annahme eines Temperaturanstiegs um zwei Grad Celsius bis zur Mitte des Jahrhunderts und einem Anstieg der Wintertemperaturen kommt auch eine Studie des Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik zu dem Ergebnis, dass sich der Heizbedarf von Gebäuden bis 2035 um etwa 25 Prozent und bis 2085 um etwa 30 Prozent verringern wird (Herrmann et al. 2016). Eine weitere Projektion des Heizenergiebedarfs unter Verwendung von Modellgebäuden und verschiedenen Klimaszenarien zeigt, dass der Wärmebedarf in Deutschland aufgrund steigender Temperaturen voraussichtlich weiter sinken wird (Andrić et al. 2017). Weitere Projektionen für den Zeitraum 2035 bis 2060 unter Annahme eines mittleren Temperaturanstiegs von 2,1 Grad Celsius gehen von einer Reduktion des Heizenergiebedarfs von 17 bis 24 Prozent aus (Bürger et al. 2017).

Angesichts des projizierten Temperaturanstiegs in Deutschland wird sich der Bedarf an Heizenergie klimawandelbedingt in Zukunft deutlich verringern. Jedoch bestehen Unsicherheiten, da das vereinzelnde Auftreten von kalten Winter durch Verschiebungen des polaren Jetstreams nicht ausgeschlossen werden kann (Hall et al. 2015). Eine Erhöhung des Heizenergiebedarfs in solchen Jahren kann somit trotzdem noch stattfinden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 32: „Bedarf an Heizenergie“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Kernaussagen zu „Bedarf an Heizenergie“

- Projektionen der Heizgradtage zeigen für die Mitte des Jahrhunderts für das 15. Perzentil des RCP8.5-Szenarios eine Abnahme auf bis zu 2.600 Heizgradtage (in Kelvin*Tag) auf (im Vergleich mit bis zu 3.400 Heizgradtage im Bezugszeitraum). Für den anderen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) werden insbesondere für die Höhenlagen verstärkt Werte von bis zu 3.400 Heizgradtagen erwartet.
- Für das Ende des Jahrhunderts wird sich der Heizbedarf weiter reduzieren. Dabei kann es in einem Fall (15. Perzentil des RCP8.5) in weiten Teilen des Landes zu einer Abnahme auf bis zu 1.000 Heizgradtage kommen. Der höchste deutschlandweite Heizbedarf zum Ende des Jahrhunderts lässt sich für die Höhenlagen feststellen. Weitere Projektionen gehen von einer ähnlichen Abnahme des Heizenergiebedarfs um bis zu 30 Prozent bis zum Ende des Jahrhunderts aus.
- Vereinzelt können jedoch auch in Zukunft durch Verschiebungen des polaren Jetstreams kalte Winter und damit Zeiträume mit höherem Heizenergiebedarf auftreten.

3.2.3 Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Energieträger werden Stoffe oder Medien bezeichnet, die durch Umwandlungsprozesse Energie abgeben. In 2018 war Mineralöl der am meisten verwendete Energieträger (34 Prozent), gefolgt von Erdgas (23,4 Prozent), erneuerbaren Energien (13,8 Prozent), Braunkohle (11,3 Prozent), Steinkohle (10,9 Prozent) und Kernenergie (6,3 Prozent) (BMWi 2019b). Dabei wird zwischen fossilen Energieträgern wie Erdöl, Erdgas und Kohle und erneuerbaren Energieträgern wie Windenergie, Sonnenstrahlung, Wasserkraft und Biomasse unterschieden (Hüttenrauch et al. 2017; BGR 2019). Die Betrachtung innerhalb dieser Klimawirkung konzentriert sich auf fossile Energieträger.

Für die fossilen Energieträger Stein- und Braunkohle sowie Erdöl und Erdgas ist die Anlieferung des jeweiligen Primärmaterials Voraussetzung für eine verlässliche Stromerzeugung (Hüttenrauch et al. 2017). Lieferketten für fossile Energieträger sind entweder von Verkehrsinfrastrukturen beim Transport über Straßen, Schienen oder Wasserstraßen oder, im Fall von Pipelines, von Leitungsnetzen abhängig (Grussmann et al. 2014). Lieferausfälle treffen vor allem die Energiegewinnung aus Gas und Kohle, daher werden diese auch als lieferabhängige Energiequellen bezeichnet (Hüttenrauch et al. 2017).

Insgesamt importiert Deutschland 70 Prozent seiner Primärenergieträger (Schiffer 2017). Zu den wichtigsten Lieferketten zählen Gastransporte via Pipelines aus Russland und Norwegen, (Leyris et al. 2018; BNetzA und BKartA 2019). Steinkohle wird zu 93 Prozent aus dem Ausland importiert, während Deutschland als weltgrößtes Braunkohleförderland seine eigene Braunkohle abbaut (BGR 2019; BMWi 2019a). Rohöl wird über Pipelines zur Weiterverarbeitung zu verschiedenen deutschen Raffinerien transportiert (BMWi o.J.).

Das Energiekonzept der Bundesregierung hat zum Ziel, den Primärenergieverbrauch bis 2050 um 50 Prozent im Vergleich zu 2008 zu senken (BMWi 2019c). Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung soll mindestens 80 Prozent betragen (BMWi 2010; BMWi 2018b). Durch die daraus entstehende Abnahme der Nutzung von fossilen Energieträgern wie Kohle, Gas und Öl auf 20 Prozent (null Prozent bei der Kernenergie) zur Stromerzeugung, kann auch mit geringeren Liefermengen gerechnet werden. Entstehende Unterbrechungen der regionalen Lieferketten von fossilen Energieträgern durch die Folgen des Klimawandels werden somit bis 2050 eine graduell abnehmende Relevanz für die Stromversorgung haben.

Die Lieferketten für verbleibende fossile Energieträger können durch verschiedene klimatische Einflüsse und extreme Wetterereignisse beeinträchtigt werden (Grussmann et al. 2014). Stürme und Unwetter können zu Einschränkungen der Verkehrsinfrastruktur führen, welche den Transport von Energieträgern über Schienen, Straßen und Binnenschifffahrtsstraßen beeinflussen (Bardt et al. 2013b). Auch durch Starkniederschläge ausgelöste Landrutschungen und Überschwemmungen und durch Stürme bedingte Baumschläge können Unterbrechungen nach sich ziehen (Schaeffer et al. 2012). Hochwasser, wie zum Beispiel das Elbehochwasser im Jahr 2002, können durch Wassereintritte zu Schäden an Gas-Versorgungsleitungen führen (DVGW 2003). Der Transport von Energieträgern wie Mineralöl und Kohle wird zudem von Niedrigwasserereignissen beeinflusst (Cortekar und Groth 2013). Einschränkungen der Beladungsgrade der Schifffahrt aufgrund von zu niedrigen Wasserständen der Binnenschifffahrtsstraßen können zu Engpässen in der Versorgung der Energieträger führen (Bardt et al. 2013b; Groth und Cortekar 2015) (siehe „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“).

Der Transport von Steinkohle über Binnenschiffahrtsstraßen wurde bereits im Sommer 2015 durch langanhaltendes Niedrigwasser beeinträchtigt. Um Versorgungsengpässe zu vermeiden, waren teilweise Verlagerungen vom Binnenschiff auf die Schiene notwendig (BNetzA und BKartA 2016). Braunkohle dagegen wird aufgrund des niedrigen Energiegehalts aus wirtschaftlichen Gründen oftmals nur über kurze Strecken transportiert und zeitnah verfeuert (Cortekar und Groth 2013).

Gas- und Ölleitungen, die unterirdisch verlaufen, sind von klimatischen Einflüssen selten betroffen (Cortekar und Groth 2013). So war die Gasversorgung in Deutschland in der Vergangenheit durch hohe Zuverlässigkeit geprägt (BNetzA und BKartA 2019). Mit einer durchschnittlichen Unterbrechungsdauer für Verbraucher von 0,99 Minuten im Jahr 2017 ist der Wert im Vergleich zum Wert von 2016 (1,03 Minuten) gesunken und behält somit die seit 2006 bestehende einstellige Unterbrechungsdauer bei.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Beförderung fossiler Energieträger über Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen wird in Zukunft verstärkt Beeinträchtigungen durch die Auswirkungen von Niedrig- und Hochwasserereignissen ausgesetzt sein (Nies und Apfel 2011; Bardt et al. 2013a; Cortekar und Groth 2013). Ein erwarteter Anstieg von Niedrigwasserereignissen kann sowohl für die Mitte wie auch für das Ende des Jahrhunderts zu Einschränkungen in der Binnenschiffahrt führen und sich somit auf die Lieferketten von Energieträgern wie Mineralöl und Kohle auswirken (siehe „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrig- und Hochwasser)“ im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Beeinträchtigung des Warentransports über Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Energieträger, welche über Pipelines transportiert werden, werden eher als gering betrachtet (Cortekar und Groth 2013).

Im Einklang mit den Klimazielen der Bundesregierung nimmt, wie bereits erwähnt, der Primärenergieverbrauch in Deutschland stetig ab (BMW 2019b; UBA 2019b). Zwar wird der verbleibende Anteil fossiler Energieträger grundsätzlich für die Stromerzeugung durch die Unabhängigkeit von Witterung und Tageszeit auch noch langfristig von Bedeutung sein. Allerdings ist durch die gegenwärtig hohe Widerstandsfähigkeit von Lieferketten das Unterbrechungsrisiko gering und wird sich mit einer sinkenden Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zukünftig weiter reduzieren (Bardt et al. 2013b).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 33: „Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger“: 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 „Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger“

- ▶ Regionale Lieferketten für den Transport fossiler Energieträger wie Kohle und Mineralöl über Wasserstraßen können zukünftig stärkeren Belastungen durch Niedrigwasserereignisse ausgesetzt sein.
- ▶ Die Versorgung mit Energieträgern über Pipelines wie Gas und Rohöl wird auch in Zukunft nur geringen Risiken durch die Folgen des Klimawandels ausgesetzt sein.
- ▶ Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts und spätestens bis 2050 durch die geplante Senkung des Primärenergieverbrauchs von fossilen Energieträgern und den geplanten Kohleausstieg bis 2038 Unterbrechungen der regionalen Lieferketten eine geringere Bedeutung für die Energieversorgung aufweisen werden.

3.2.4 Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke

Hintergrund und Stand der Forschung

Kühlwasser ist von hoher Bedeutung für die Stromerzeugung in thermischen Kraftwerken wie Kohle-, Kern-, Gas- und Dampfkraftwerken. Im Brennvorgang werden nur etwa 40 Prozent der Energie in Strom umgewandelt. Die restliche Energie wird in Wärme umgewandelt, die entweder an die Luft oder ins Wasser abgegeben wird. Die Kühlung durch Wasser erfolgt über die Wasserentnahme aus Flüssen und Kanälen, wobei das Kühlwasser am Ende wieder zurückgeführt wird (LAWA 2017). Unterschiedliche Kühlverfahren wie Durchlaufkühlung (sehr wasserintensiv) oder Kreislaufkühlung (geringerer Frischwasserbedarf) führen hierbei zu unterschiedlichen Wasserverbräuchen (Sieber 2013; Amado 2016). Bei der Ablaufkühlung werden Kühltürme genutzt, um die Kühlwassertemperatur vor der Rückführung in die Gewässer zu senken (Koch und Vögele 2009; Büchner et al. 2013). Der Bedarf an Kühlwasser hängt demnach stark vom Kühlverfahren ab. Das Kühlverfahren ist zudem von der Wasserverfügbarkeit und von Gewässerschutzmaßnahmen abhängig (UBA 2017).

In Deutschland haben sich die Wasserentnahmen in den letzten Jahren stark reduziert. Die Gründe dafür liegen neben den Einsparungen in der öffentlichen Wasserversorgung und Effizienzmaßnahmen im Bereich der industriellen Wasserkreisläufe auch in einem sinkenden Bedarf an Kühlwasser für Kraftwerke (Koch et al. 2012). Demnach konnte im Jahr 2016 die Wasserentnahme für die Energieerzeugung um etwa 16,1 Milliarden Kubikmeter und damit um mehr als die Hälfte gegenüber dem Jahr 1991 reduziert werden. Trotzdem werden auch heute noch knapp 55 Prozent der gesamten Wasserentnahmen in Deutschland für die Energieversorgung verwendet (Destatis 2018).

Die Wasserverfügbarkeit ist von der Niederschlagsmenge und den Zuläufen in die jeweiligen Gewässer abhängig. Trockenperioden können zu niedrigen Wasserständen führen und langanhaltende Hitze erhöht die Wassertemperatur (Sieber 2013; Zhou et al. 2018). Niedrigwasserstände können die Verfügbarkeit von Kühlwasser einschränken und den Wirkungsgrad von Kraftwerken verschlechtern (Mahammadzadeh und Biebeler 2009; Rübbelke und Vögele 2011). Bei hohen Gewässertemperaturen und niedrigen Wasserständen kann die Kühlwasser-Entnahme und -Einleitung in die Gewässer aufgrund von Umweltvorschriften eingeschränkt werden (Bieritz 2015; LAWA 2017; Zhou et al. 2018). Diese dienen dem Schutz der Gewässerökologie und regulieren die Entnahme aus und Einleitung in Gewässer für Kühlzwecke (Bardt et al. 2013b). So liegt der Grenzwert der zulässigen Gewässertemperatur zur Einleitung von Kühlwasser basierend auf der europäischen Wasserrahmenrichtlinie bei 28 Grad Celsius (EU - RL 2006/44/EG 2006). Teilweise erstellen die Wasserbehörden in Jahren mit extremen Trockenperioden aber Ausnahmegenehmigungen zur Sicherstellung der Stromproduktion (UBA 2019b).

Trockenperioden und Hitze haben in der Vergangenheit vermehrt zu einem Mangel an Kühlwasser geführt (Rothstein et al. 2008; Pechan und Eisenack 2014). So mussten aufgrund der Hitzewelle im Sommer 2018 mehrere Kraftwerke ihre Leistungen drosseln. Der Grund dafür war mangelndes Kühlwasser durch niedrige Flusspegel und steigende Wassertemperaturen (UBA 2019b). Eine Gefährdung der deutschen Stromversorgung durch die Drosselung einzelner Kraftwerke ist jedoch nicht ersichtlich (Bardt et al. 2013a).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts liegen verschiedene Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Kühlwasserversorgung thermischer Kraftwerke vor. Eine Projektion der Auswirkungen des Klimawandels auf Kohle- und Kernkraftwerke mit Durchlauf- und Kreis-

laufkühlung für den Zeitraum 2011 bis 2070 zeigt, dass besonders für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung eine Reduktion des Wirkungsgrades erwartet werden kann. Für die betrachteten Kraftwerke beider Kraftwerkstypen kann mit einer jährlichen Produktionsminderung von bis zu 0,89 Megawatt gerechnet werden (Hoffmann et al. 2013). Weitere Studien bestätigen die Wahrscheinlichkeit eines sinkenden Wirkungsgrades und zukünftigen Einschränkungen für thermische Kraftwerke mit Durchlaufkühlung für die Mitte des Jahrhunderts (Büchner et al. 2013; Bieritz 2015; Bonjean Stanton et al. 2016).

Die projizierten Entwicklungen bei der Entnahme von Kühlwasser sind in erster Linie dann relevant, wenn es keine Änderungen des Kraftwerksparks in Deutschland gibt. In einem solchen Zukunftsszenario wären verschiedene Arten thermischer Kraftwerke stark beeinträchtigt. Die derzeitige Beschlusslage sieht jedoch vor, dass es sowohl in der Kern- als auch der Kohleenergie mittelfristig zu einem Ausstieg kommt (siehe 3.1.2). Dadurch reduziert sich diese Problemlage erheblich (UBA 2019b). Die Veränderungen des Kühlwasserbedarfs speziell durch die gestiegene Nutzung erneuerbarer Energien werden auch im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltbundesamts untersucht (UBA 2020).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 34: „Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke“: 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 „Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke“

- ▶ Die Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke wird durch klimatische Einflüsse wie Trockenheit und Hitze beeinflusst. Bei tiefen Wasserständen und hohen Wassertemperaturen kann es vorkommen, dass die Stromproduktion der Kraftwerke gedrosselt oder zeitweise eingestellt wird.
- ▶ Die zukünftige Zunahme an heißen Tagen und steigenden Temperaturen kann besonders im Sommer für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts die Erzeugungskapazität von thermischen Kraftwerken beeinträchtigen.
- ▶ Die Auswirkungen der Energiewende und des Kern- und Kohleausstiegs werden zu Veränderungen der Energieinfrastruktur führen. Spätestens bis zur Mitte des Jahrhunderts werden die genannten Einschränkungen aufgrund von klimatischen Änderungen durch den Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 und dem geplanten Kohleausstieg bis 2038 nur eine geringe Anzahl an thermischen Kraftwerken betreffen.

3.2.5 Ertragsminderung/-zunahme bei Photovoltaikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See

Hintergrund und Stand der Forschung

Regenerative Energieanlagen wie Photovoltaik oder Windkraftsysteme spielen eine Schlüsselrolle in der Erzeugung erneuerbarer Energien. Photovoltaikanlagen wandeln Sonnenstrahlung in elektrische Energie um. Die unter Verwendung verschiedener Solarzellenkonzepte hergestellten Paneelen - zum Beispiel Siliziumtechnologien oder Dünnschichtsolarzellen - können am Boden oder an Dächern installiert werden (Patt et al. 2013; Tripathi et al. 2017). Windenergieanlagen wandeln die Energie der Luftströmung in elektrischen Strom um (Albrecht et al. 2011). Dabei kann zwischen Anlagen an Land („onshore“) und auf See („offshore“) unterschieden werden.

Die Herausforderungen von Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen in der Stromversorgung liegen in der Steuerbarkeit, der Abhängigkeit von der Wetterlage, dem Standort sowie dem Instandhaltungsaufwand, um die Versorgung sicherzustellen (Albrecht et al. 2011).

Eine große wetterbedingte Herausforderung für Photovoltaik- und Windkraftanlagen ist die sogenannte „kalte Dunkelflaute“: eine wetter- und jahreszeitbedingte Dunkelheits- und Schwachwindphase mit gleichzeitig erhöhter Nachfrage an Energie. Bei einer Analyse der Jahre 2006 bis 2016 hat sich der Zeitraum vom 23. Januar bis 6. Februar in Deutschland als besonders anfällig für eine kalte Dunkelflaute herausgestellt. Aufgrund der wetterbedingten geringen Einspeisung von Wind- und Photovoltaik-Strom, mussten in diesem Zeitraum in den untersuchten Jahren meist konventionelle Kraftwerke die Stromnachfrage decken (Huneke et al. 2017).

Photovoltaikanlagen erreichen in Deutschland über das Jahr betrachtet bereits Leistungsquoten von 80 bis 90 Prozent. Dabei sind Verluste, beispielsweise durch erhöhte Betriebstemperaturen, niedrigere Einstrahlungsbedingungen, Verschmutzungen und Anlagenausfälle berücksichtigt (Wirth 2020). In 2019 konnten Photovoltaikanlagen in Deutschland knapp über acht Prozent des Netto-Stromverbrauchs decken (Wirth 2020). An sonnigen Tagen können sie Deckungsgrade von 45 Prozent an Werktagen und 60 Prozent an Sonn- und Feiertagen erreichen (Wirth 2020). Die Verfügbarkeit von Solarstrom ist dank nationaler Wettervorhersagen planbar und auch bei regionaler Bewölkung können aufgrund der hauptsächlich dezentralen Einspeisung hohe Ertragsschwankungen vermieden werden (Wirth 2020).

Dennoch sind Photovoltaikanlagen verschiedenen klimatischen Einflüssen und extremen Wetterereignissen ausgesetzt, welchen den Ertrag der Anlagen beeinflussen können. Durch Starkwinde transportierte Sand- und Staubpartikel können sich auf den Photovoltaik-Paneelen ablagern und den Wirkungsgrad reduzieren (Patt et al. 2013; Tripathi et al. 2017). Auch die Temperatur ist ein wesentlicher Faktor für den Umwandlungswirkungsgrad von Photovoltaik-Zellen, da dieser bei steigenden Temperaturen abnimmt (Tripathi et al. 2017). Weiterhin kann durch Hagel und Unwetter die Infrastruktur der Anlagen beschädigt werden (Bardt et al. 2013a; Patt et al. 2013).

Betrachtet man das Vorkommen von Windenergieanlagen, so standen in Deutschland im Jahr 2018 über 28.000 Windenergieanlagen an Land und über 1.000 Windenergieanlagen auf See (BWE 2018). Gemeinsam deckten sie etwa 18 Prozent des Stromverbrauchs. Windkraft macht aktuell den höchsten Anteil regenerativer Energien in Deutschland aus (BMWi o.J.). Die Stromerzeugung von Windkraftanlagen hängt vom Standort, von der Windgeschwindigkeit, den technischen Bestandteilen sowie der Verschattung und Anlage-Ausfällen ab (Lück et al. 2017). Den größten Einfluss hat dabei die Windgeschwindigkeit, die wiederum durch das Wetter, durch den Zustand des Bodens, durch die Höhenlage der Anlage und durch die Schichtungsstabilität der Erdatmosphäre beeinflusst wird (Foken 2003).

Auch Windenergieanlagen werden durch klimatische Einflüsse beeinträchtigt. So müssen die Anlagen bei Starkwinden abgeschaltet werden, wohingegen ein zu niedriges Windangebot den Ertrag mindert (Bardt et al. 2013a; Cortekar und Groth 2013). Während Hitzeperioden können Anlagen zudem durch die Hitzebelastung beschädigt werden. In Kombination mit Stürmen kann es zum Abbrechen einzelner beschädigter Anlagenteile kommen.

Erwartete Entwicklung der Erträge von Photovoltaikanlagen bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Eine mögliche Zunahme der Sonneneinstrahlung kann zu einer Ertragssteigerung von Photovoltaikanlagen beitragen (Wild et al. 2015). Zu hohe Temperaturen und langanhaltende Hitzeperioden können jedoch auch zu Effizienzverlusten führen (Cortekar und Groth 2013; Patt et al. 2013; Bieritz 2015).

Projektionen des Erzeugungspotenzials von Photovoltaikanlagen unter Annahme des erwarteten Temperaturanstieges im A1B-Szenario (ähnlich dem RCP6.0) erwarten bis 2080 eine Zunahme von zwei bis sechs Prozent für Deutschland im Vergleich zu 2010 (Crook et al. 2011). Weitere Studien bestätigen die Zunahme der Energieertrags von Photovoltaikanlagen für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts (Gaetani et al. 2014; Bonjean Stanton et al. 2016). Gaetani et al. beziehen sich dabei auf eine Zunahme der Oberflächen-Sonneneinstrahlung basierend auf Aerosol-Modellierungen. Projektionen für das A1B-Szenario für die deutsche Metropolregion Nordwest für die Mitte und des Ende des Jahrhunderts zeigen keine saisonalen Veränderungen in der Ertragsentwicklung von Photovoltaikanlagen (Wachsmuth 2013).

Eine Analyse der Veränderungen des Erzeugungspotenzials von Photovoltaikanlagen in Deutschland für das RCP8.5-Szenario für das Ende des Jahrhunderts zeigt, dass Veränderungen der Oberflächenwindgeschwindigkeit keinen Einfluss auf das Erzeugungspotenzial von Photovoltaikanlagen haben (Jerez et al. 2015). Hingegen wird angenommen, dass sich durch die Folgen des Klimawandels die kurzweilige Strahlung durchschnittlich um bis zu zehn Watt pro Quadratmeter reduziert, was zu einer möglichen Reduktion des Ertragspotenzials führen kann. Zusätzlich könnte ein Anstieg der durchschnittlichen Oberflächentemperatur von drei bis vier Grad Celsius das Ertragspotenzial um bis zu weitere zwei Prozent reduzieren (Jerez et al. 2015). Wild et al. kommen bei der Analyse des Einflusses von zukünftigen Änderungen der Sonneneinstrahlung und der Temperatur unter dem RCP8.5-Szenario zu dem Schluss, dass eine Ertragsminderung für große Teile der Welt wahrscheinlich ist, für Europa jedoch leicht positive Entwicklungen der Erträge erwartet werden können (Wild et al. 2015).

Erwartete Entwicklung der Erträge von Windenergieanlagen an Land und auf See bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Windkraftanlagen müssen schon gegenwärtig kurzfristig aufgrund zu hoher Windgeschwindigkeiten abgeschaltet werden. Diese Unterbrechungen sind jedoch nur von sehr kurzer Dauer, so dass es sich insgesamt nur um wenige Stunden Abschaltung pro Jahr handelt (Bardt et al. 2013a). Die Auswirkungen von Starkwinden auf den Ertrag von Windenergieanlagen können daher als eher gering betrachtet werden.

Projektionen zukünftiger Windgeschwindigkeiten zeigen bisher keine relevanten Änderungen auf, unterliegen jedoch sehr hohen Unsicherheiten (Bonjean Stanton et al. 2016; Pinto und Reyers 2017). Für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts können daher aufgrund bestehender Unsicherheiten bei der Modellierung von Windfeldern und Windgeschwindigkeiten keine Aussagen zu zukünftigen Erträgen von Windenergieanlagen gemacht werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 35: „Ertragsminderung/-zunahme bei Photovoltaikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See“: 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 „Ertragsminderung/-zunahme bei Photovoltaikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See“

- Steigende Temperaturen und Hitzeperioden reduzieren den Wirkungsgrad von Photovoltaikanlagen. Windenergieanlagen müssen bei zu hohen Windgeschwindigkeiten zeitweise abgeschaltet werden.
- Für die Erträge von Photovoltaikanlagen liegen Projektionen vor, die sowohl eine leichte Abnahme wie auch Zunahmen erwarten. Insgesamt handelt es sich um geringe Änderungen.
- Für die zukünftigen Erträge von Windenergieanlagen kann davon ausgegangen werden, dass auch in Zukunft Starkwinde kaum zu Unterbrechungen führen werden. Projektionen zukünftiger Windgeschwindigkeiten zeigen keine relevanten Änderungen auf, unterliegen jedoch sehr hohen Unsicherheiten, weshalb keine Aussagen zu den zukünftigen Erträgen von Windenergieanlagen getroffen werden können.

3.2.6 Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung

Hintergrund und Stand der Forschung

In Deutschland ergeben sich Einschränkungen in der Energieversorgung insbesondere durch Unterbrechungen der Stromversorgung über Verteil- und Übertragungsnetze. Dabei können überirdisch laufende Hochspannungsleitungen und unterirdisch verlegte Erdkabel im Mittel- und Niederspannungsbereich unterschieden werden (Bieritz 2015). Unterbrechungen der Energieversorgung können beispielsweise auftreten, wenn die Netzinfrastuktur durch die Folgen extremer Wetterereignisse beschädigt wird.

Neben Unterbrechungen können auch Netzschwankungen der Verteil- und Übertragungsnetze die Zuverlässigkeit der Energieversorgung beeinflussen. Netzschwankungen werden unter anderem bei erneuerbare Energien durch Tag-Nacht-Verfügbarkeiten von Photovoltaik-Strom und durch Flauten-Wechsel bei Windenergie ausgelöst (Stadt Crailsheim 2013).

Deutschland besitzt einer der höchsten Versorgungssicherheiten in Europa mit einem eng verknüpftem Stromnetz (Albrecht et al. 2011; UBA 2019b). Im Jahr 2017 lag die wetterbedingte Nichtverfügbarkeit von Strom aufgrund atmosphärischer Einwirkungen wie Wind- und Temperatureinwirkungen und Überspannungen durch Blitze und höherer Gewalt wie beispielsweise Orkane und Hochwasser, für den Endverbraucher bei etwa acht Minuten. Die Unterbrechungsdauer in den letzten Jahren hat sich besonders nach Orkanen wie Kyrill in 2007 und Herwart und Xavier in 2017 erhöht (UBA 2019b). Die Mitgliedschaft Deutschlands im europäischen Netzverbund trägt weiterhin zur Stabilität der Stromversorgung bei, da Erzeugungsschwankungen ausgeglichen werden können (BBK 2019).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Zuverlässigkeit der Energieversorgung unterscheiden sich regional und sind schwer vorhersehbar (Bardt et al. 2013b). Häufige Ursachen für Unterbrechungen sind die Auswirkungen extremer Wetterereignisse wie Stürme, Unwetter und Hitzeperioden (Mideksa und Kallbekken 2010; Cortekar und Groth 2013; Ward 2013). Hohe Temperaturen verschlechtern zudem die Übertragungskapazität von Hochspannungsleitungen (Cradden und Harrison 2013; Kurth und Breuer 2018). Weite Teile der Verteil- und Übertragungsinfrastruktur sind klimatischen Einflüssen ausgesetzt. Durch Hochwasser oder durch Starkniederschläge ausgelöste Überschwemmungen können beispielsweise Schaltanlagen am Boden beschädigen oder Umspannungsanlagen überfluten (Cortekar und Groth 2013; Ward 2013). Neben den oberirdischen Leitungen kann Trockenheit im Erdreich bei Erdkabeln dazu führen, dass die Wärme nicht abströmen kann und sich die Energieverteilung staut (Mideksa und Kallbekken 2010; Reusswig et al. 2016). Netzschwankungen ergeben sich vor allem durch Änderungen der Erträge von Wind- und Photovoltaikanlagen (siehe 3.2.5).

Schäden durch Stromunterbrechungen sind mit hohen finanziellen Kosten verbunden und können für die Energiewirtschaft ein finanzielles Risiko darstellen (Bieritz 2015; StMUV 2015). Unterbrechungen der Stromversorgung durch den Klimawandel haben daher nicht nur Auswirkungen auf die Lebensqualität und den Energiewirtschaftssektor an sich, sondern beeinträchtigen durch entstehende Ausfallzeiten die gesamte Volkswirtschaft (Cortekar und Groth 2013). Ein Rückgang der Versorgungssicherheit kann zu erheblichen wirtschaftlichen Kosten führen. Growitsch et al. kamen bei einer Analyse der wirtschaftlichen Kosten zu einer Summe von etwa 7,6 Millionen Euro pro Gigawatt je durchschnittlicher Unterbrechungsstunde (Growitsch et al. 2014).

Unterbrechungen der Stromversorgung traten in jüngerer Vergangenheit immer wieder auf. Heftige Unwetter mit Gewitter und Hagel führten zum Beispiel im Juli 2019 in München zu einem technischen Defekt der Stromleitungen mit einem langanhaltenden Stromausfall. Vor allem

in den Sommermonaten kommt es vermehrt zu Stromausfällen, denn die zunehmende Hitze belastet die Stromnetze durch erhöhte elektrische Widerstände. Für Nieder- und Mittelspannungsnetze zeichnete sich in den letzten Jahren jedoch ein abnehmender Trend der Versorgungsunterbrechung ab (UBA 2019b). Zu vergleichsweise hohen Ausfällen führten besonders Orkane, welche als Ereignisse höherer Gewalt gelten.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Durch den erwarteten Temperaturanstieg können zukünftig Schäden an Verteil- und Übertragungsnetzen verstärkt werden (Reusswig et al. 2016). Gleichzeitig sinkt die Wahrscheinlichkeit der Vereisung von Übertragungsleitungen. Der erwartete Anstieg an extremen Wetterereignissen wie Starkniederschlägen und Heißen Tagen kann auch in Zukunft zu Beeinträchtigungen von oberirdischen Übertragungsleitungen und -Infrastrukturen führen (EC 2011; Ward 2013; Kurth und Breuer 2018). Bei Wind- und Photovoltaikanlagen werden sich auch in Zukunft wetterbedingte Schwankungen ergeben.

Mögliche Netzschwankungen hängen zudem von dem durch die Energiewende angestoßenen Netzausbau ab. Die Veränderung des Strommix hin zu erneuerbaren Energien wird so in Zukunft neue Herausforderungen für die Zuverlässigkeit der Energieversorgung schaffen (Bardt et al. 2013b). Besonders in Zusammenhang mit dem zukünftigen Ausbau von Leitungen kann die Energieversorgung zusätzlichen Belastungen ausgesetzt sein, welches die Störanfälligkeit des Netzes und das Risiko von Netzschwankungen erhöhen wird (Bardt et al. 2013b). Dies liegt unter anderem an der steigenden Bedeutung von Verteilnetzen zur Einspeisung erneuerbarer Energien (Schmidt-Curreli et al. 2016). Mit steigender Einspeisung durch lokale Haushalte, zum Beispiel durch private Photovoltaikanlagen, können im Niederspannungsnetz verstärkt Schwankungen auftreten. Der gleichzeitige Ausbau von Speichertechnologien wie Pumpspeicher oder Power-to-Gas Technologien zur Nutzung von überschüssigen Strom zur Wasserstoffproduktion kann jedoch wieder zur Stabilisierung des Netzes beitragen (Cortekar und Groth 2013; Schmidt-Curreli et al. 2016). Im Bereich der Hochspannungs-Übertragungsleitungen sieht der geplante Netzausbau vor, diese größtenteils als Erdkabel zu verlegen, womit die Leitungen verringert klimatischen Einflüssen ausgesetzt werden (Schmidt-Curreli et al. 2016).

Detaillierte Projektionen der Entwicklung der Zuverlässigkeit der Energieversorgung für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts liegen aufgrund der genannten Unsicherheiten und der hohen Veränderungen des deutschen Stromnetzes nicht vor.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 36: „Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung“: 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 „Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung“

- ▶ Extreme Wetterereignisse wie Hitzeperioden, Starkniederschläge, Stürme und Unwetter können Unterbrechungen und Netzschwankungen in der Energieversorgung bedingen. Zukünftige Zunahmen an Starkniederschlägen und heißen Tagen können daher die Zuverlässigkeit der Energieversorgung beeinträchtigen.
- ▶ Der durch die Energiewende bedingte Netzausbau kann bis zur Mitte des Jahrhunderts als verstärkender Faktor für mögliche Unterbrechungen in der Energieversorgung dienen.
- ▶ Aufgrund der hohen Verknüpfungsdichte des deutschen Stromnetzes sind jedoch weiterhin nur seltene Unterbrechungen zu erwarten, da bei einzelnen Beeinträchtigungen andere redundante Leitungen verwendet werden können.

3.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

3.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Viele Maßnahmen und Instrumente zur Anpassung im Handlungsfeld können direkt von den jeweiligen Akteuren im Energiesektor (Stromerzeuger und -produzenten, Stromversorger und Netzbetreiber) durchgeführt werden (BMW 2011; Mima et al. 2011). Dazu gehören beispielsweise die Berücksichtigung von Klimafolgen bei der Investitionsplanung oder der Brennstoffversorgung (BMW 2011). Diese Form der autonomen Anpassung wird im Folgenden nicht näher betrachtet. Stattdessen wird insbesondere die Anpassung durch staatliches und regulierendes Handeln, zum Beispiel durch die Gestaltung der Rahmenbedingungen und des rechtlichen Kontextes, untersucht.

Der APA III nennt vergleichsweise wenige Instrumente oder Maßnahmen zur Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“. So ist angedacht, eine Überprüfung von Wärmelastplänen unter veränderten hydrologischen und Temperaturbedingungen durchzuführen (APA III: 2.33). Dabei werden Optimierungsmöglichkeiten im Kraftwerksmanagement untersucht und der Stand der Technik und die Verfügbarkeit von Kühltechnologien geprüft, um sich auf die zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit öfter auftretenden Einschränkungen bei der Einleitung von Kühlwasser und der erlaubten Wasserentnahme anzupassen. Auch die Grundlagenermittlung für den Umgang von Bund und Ländern mit Niedrigwasser trägt zur Anpassung an das erhöhte Risiko von Kühlwassermangel für thermische Kraftwerke bei (APA III: 1.29).

Grundsätzlich besteht im Energiesektor ein enger Zusammenhang mit beschlossenen Maßnahmen zum Klimaschutz (Scheele und Oberdörffer 2011; Gößling-Reisemann et al. 2012; Cronin et al. 2018; Auerbach et al. 2020). So zeigen der Klimaschutzplan 2050 und das Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung die energiepolitische Planung für die nächsten Jahrzehnte auf (BMU 2016; BMU 2019b).

Über die beschlossenen Maßnahmen hinaus ergeben sich in verschiedenen Bereichen des Handlungsfeldes Möglichkeiten der weiterreichenden Anpassung. Generell besteht dabei ein hohes Potenzial für no-regret Maßnahmen, also Maßnahmen, welche auch ohne Klimawandel als ökonomisch sinnvoll angesehen werden können (Scheele und Oberdörffer 2011). Dies gilt vor allem für Maßnahmen zur Energieeffizienz, die gleichzeitig auch die Anpassungsfähigkeit erhöhen. Bei thermischen Kraftwerken können Technologien zur Wärmelastreduzierung (wie die Erhöhung der Kühlwasser-Kreislaufzahl) oder die Nutzung von recyceltem Wasser zur Kühlung gefördert werden (Scheele und Oberdörffer 2011; Gößling-Reisemann et al. 2012). Ergänzend können auch verstärkte Investitionen in erneuerbare Energien neben dem Klimaschutz als Anpassungsmaßnahme zur Diversifizierung des Energiemix dienen und somit zur Zuverlässigkeit der Energieversorgung beitragen (UBA 2011; CSC und CDP 2013; Cronin et al. 2018). Neben der Förderung von Maßnahmen zur Energieeffizienz können zur Vorbeugung von möglichen Versorgungsengpässen in der Energieerzeugung staatliche Anreize zum Aufbau von Stromspeicher- und Reservekapazitäten initiiert werden (Scheele und Oberdörffer 2011; UBA 2011; Ciscar und Dowling 2014).

Die Anpassungsfähigkeit der Energieinfrastruktur kann durch Investitionen in dezentrale Energieversorgungsstrukturen erhöht werden. Dezentrale Strukturen und die Etablierung von Smart Grids, also Elektrizitätsnetzen, welche sich modular und flexibel den jeweiligen Bedingungen von Angebot und Nachfrage anpassen, können einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Zuverlässigkeit der Energieversorgung leisten (BNetzA 2011; Ebinger und Vergara 2011; Scheele und Oberdörffer 2011; UBA 2011). Im Bereich der Energienachfrage werden unter anderem die För-

derung von oder auch rechtliche Vorgaben zum energieeffizientem Bauen als no-regret Maßnahmen zur Regulierung des Endenergieverbrauchs aufgeführt (Mima et al. 2011; Ciscar und Dowling 2014; Bürger et al. 2017). So können beispielsweise Dämmstandards für Neubauten einen Beitrag zur Reduktion von Kühl- wie auch Heizenergie leisten (Mahammadzadeh und Biebler 2009; Bürger et al. 2017). Speziell zur Anpassung an den zukünftig steigenden Bedarf an Kühlenergie existieren verschiedene Maßnahmen. Der flächendeckende Einsatz von konventionellen Klimaanlageanlagen wird aufgrund des hohen Energieverbrauchs nicht als empfehlenswert angesehen (Bettgenhäuser et al. 2011; Heinrich et al. 2014). Daher sind besonders alternative Kühltechnologien, wie Verschattung, Verdunstungskühlung, Dach- und Fassadenbegrünung oder die Nutzung von industrieller Abwärme zur Kühlung von großem Interesse (Scheele und Oberdörffer 2011; Heinrich et al. 2014; Sieker et al. 2019). Unter Betrachtung des abnehmenden Bedarfs an Heizenergie kann auch die Förderung von Projekten zur Erforschung integrativer Systeme für den Heiz- und Kühlbedarf, zur Umfunktionierung von Heiz- zu Kühlkörpern oder zur Entwicklung von zentralen Kältenetzen zur Anpassung des Kühlenergiebedarfs beitragen.

Neben den aufgeführten Maßnahmen und Instrumenten erscheint eine Integration des Themas Klimaanpassung in Normungsprozesse als sinnvoll, um einen rechtlichen Rahmen für Anpassung zu schaffen (BMWi 2011; UBA 2011; WEC 2015). Beispielsweise können Klimaanpassungsmaßnahmen in Normen und Vorschriften zum Bau von energietechnischen Anlagen und Infrastrukturen verankert werden (WEC 2015).

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass Anpassung im Handlungsfeld besonders in der Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ stark ausgeprägt ist (WEC 2015). Durch verschiedene Maßnahmen im Forschungsbereich sowie den Austausch von Akteuren des Energiesektors in entsprechenden Netzwerken, wird auch die Dimension „Wissen“ bereits vielfältig adressiert (Madry 2011). Neben den genannten Anpassungsdimensionen sind vor allem „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ sowie „Finanzielle Ressourcen“ zur Förderung von Klimaanpassungsprojekten von hoher Bedeutung, um die Akteure im Energiesektor zu unterstützen, Anreize zur Anpassung zu schaffen und eine Marktregulierung im Sinne der Anpassung anzustreben (WEC 2015). Zusätzlich zu den Anpassungsdimensionen spielt die Risikowahrnehmung und das Risikomanagement der Energieunternehmen eine wichtige Rolle zur Anpassung und zum Umgang mit vorhandenen Unsicherheiten (Madry 2011).

Bei zukünftiger Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ ist der enge Zusammenhang mit den Zielen der Energiewende von hoher Bedeutung. Dabei ist zu beachten, dass die im Rahmen der Energiewende beschlossenen Maßnahmen und Ziele sich nicht negativ auf zukünftige Anpassungspotenziale auswirken (Gößling-Reisemann et al. 2012). So sind beispielsweise Interessenskonflikte mit Anpassungsmaßnahmen im Bereich Natur- und Landschaftsschutz denkbar (Demuth et al. 2016). Gleichzeitig sollten Maßnahmen der Anpassung im Handlungsfeld nicht zu einem erhöhten Energieverbrauch und gegebenenfalls gestiegenem Emissionsverbrauch beitragen. Dies wird beispielsweise bei der in Zukunft zu erwartenden Zunahme an Klimageräten in deutschen Haushalten stark diskutiert (Bettgenhäuser et al. 2011; Mima et al. 2011; Bürger et al. 2017; Repenning et al. 2018). Hier können unter anderem die oben genannten energiesparenden Kühltechnologien eine klimafreundliche Alternative bieten und so Fehlanpassung verhindern. Insgesamt bietet die durch die Energiewende geplante Transformation des Energiesystems ein Gelegenheitsfenster zur Initiierung weiterreichender Anpassungsmaßnahmen.

Hindernisse in der Anpassung des Energiesektors können vor allem bei der Durchführung von größeren baulichen Maßnahmen wie beispielsweise der Errichtung von Energieanlagen auftreten. Die dafür durchzuführenden Planungs- und Genehmigungsverfahren können mitunter zu einer längeren Anpassungsdauer führen. Eine mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz für die Maßnahmen kann unter Umständen auch die Umsetzung verhindern (BMWi 2011; Scheele und

Oberdörffer 2011). Weitere Hindernisse der Anpassung im Handlungsfeld können die finanziellen Kosten der jeweiligen Anpassungsmaßnahme darstellen. Dies ist beispielsweise der Fall, sofern Anpassung die Wettbewerbsfähigkeit am Markt einschränkt oder ausreichend finanzielle Anreize zur Anpassung fehlen (ausgenommen der Umsetzung gesetzlicher Vorgaben) (Madry 2011).

Maßnahmen der transformativen, systemüberschreitenden Anpassung im Handlungsfeld könnten speziell an der Lage der Energieinfrastrukturen ansetzen. Eine transformative Anpassungsmaßnahme wäre beispielsweise eine Standortverlagerung an weniger vulnerable Orte (Ebinger und Vergara 2011; Scheele und Oberdörffer 2011; Ciscar und Dowling 2014; Bieritz 2015). Da dies jedoch mit einem hohen Kostenaufwand verbunden ist, erscheint diese Maßnahme nur dann denkbar, wenn die Möglichkeiten der beschlossenen Maßnahmen und weiterreichenden Anpassung ausgeschöpft sind und das Schadensrisiko andernfalls nicht handhabbar wäre (Scheele und Oberdörffer 2011).

Insgesamt ergibt sich ein recht heterogenes Bild der Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass beschlossene Maßnahmen und weiterreichenden Anpassung in verschiedenen Punkten der Wertschöpfungskette, bei verschiedenen Energieträgern und Akteuren ansetzen. Die benannten Maßnahmen weisen daher eine hohe Vielfalt auf, sind jedoch hauptsächlich im Bereich der Förderung technologischer und baulicher Maßnahmen angesiedelt. Rechtliche Grundlagen schaffen zusätzlich den Rahmen zur Initiierung und Umsetzung von Anpassungsprozessen.

3.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ bestehen zahlreiche direkte Zusammenhänge mit Anpassungskapazitäten und -möglichkeiten in anderen Handlungsfeldern. So sind beim Bedarf an Kühlenergie direkte Wechselwirkungen mit beschlossenen Maßnahmen in den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (Klimawirkungen „Niedrigwasser“ und „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“), „Bauwesen“ („Stadtklima/Wärmeinseln) und „Menschliche Gesundheit“ („Hitzebelastung“) vorhanden. Unterbrechungen der regionalen Lieferketten für Energieträger stehen vor allem beim Transport von Steinkohle (für den Zeitraum bis zum geplanten Kohleausstieg) und Mineralöl per Schiff in direktem Zusammenhang mit den beschlossenen und weiterreichenden Maßnahmen der Klimawirkungen „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ und „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. Maßnahmen zur Steigerung der Anpassungskapazität gegenüber diesen Klimawirkungen haben daher eine positive Auswirkung auf die Minderung von Unterbrechungen in der regionalen Lieferkette von den genannten Energieträgern. Anpassungsaktivitäten an Situationen mit mangelndem Kühlwasser für thermische Kraftwerke weisen Wechselwirkungen mit verschiedenen Handlungsfeldern auf. So bestehen auch hier Anknüpfungspunkte an die Anpassung an Niedrigwassersituationen in der Binnenschifffahrt. Weiterhin ergeben sich auch Querverweise zu den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (insbesondere der Gewässertemperatur), „Bauwesen“, „Fischerei“ und „Biologische Vielfalt“, sodass bei Anpassungen der Kühltechnologie die Auswirkungen auf die genannten Handlungsfelder berücksichtigt werden sollten. Im Bereich der erneuerbaren Energien und mit der steigenden Relevanz von Biomasse für die zukünftige Energieversorgung können sich weitere Wechselwirkungen mit Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ ergeben (Ebinger und Vergara 2011).

3.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ wird durch Beiträge aus allen drei Querschnittsfelder gestärkt. Der Bevölkerungs- und Katastrophenschutz trägt mit den Arbeiten zum Schutz und Erhalt kritischer Infrastrukturen (zu denen unter anderem auch die Einrichtungen der Energieversorgung gehören) zur Anpassung bei (UBA 2011). In Zusammenarbeit mit Energieerzeugern und -produzenten können die erlangten Erfahrungen aus Einsätzen geteilt werden und so zur Entwicklung von Anpassungskonzepten beitragen. Auch unterstützt der Bevölkerungs- und Katastrophenschutz in der Erstellung von Notfallplänen und der Vorhaltung von Notstromaggregaten (Ebinger und Vergara 2011).

Die Finanzwirtschaft leistet im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ in erster Linie in der Rolle des Investors einen Beitrag zur Klimaanpassung. So kann sie durch gezieltes Investment den Ausbau von erneuerbaren Energien unterstützen. Zudem werden Versicherungen im Bereich der Leistungsdeckung für neuartige Speicherkonzepte von Windenergie- und Photovoltaikanlagen angeboten und Förderprogramme für Batteriespeichersysteme initiiert (siehe zum Beispiel KfW 2018; Munich RE 2019). Auch existieren Versicherungen gegen extreme Wetterereignisse, die zum Beispiel zu Produktionsausfällen im Energiesektor führen können (Mahammadzadeh und Biebeler 2009).

Aus dem Bereich der Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung existieren Beiträge zur Anpassungskapazität beim Flächenbedarf für den Ausbau erneuerbarer Energien oder bei Flächen- ausweisungen zur Ausstattung von thermischen Kraftwerken mit Kühltürmen (Scheele und Oberdörffer 2011; Birkmann et al. 2012; Albrecht et al. 2018).

3.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 37: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

		Gegen- wart	2031-2060		2071-2100		
			optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		gering	gering	gering	gering	gering	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegen- wart	2031-2060		2071-2100		Anpassungs- dauer
			optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
Bedarf an Kühlenergie	Klimarisiko	gering	gering	gering	mittel	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Unterbrechung der regi- onalen Lieferketten für Energieträger	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Mangelndes Kühlwas- ser für thermische Kraftwerke	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Ertragsminderung/-zu- nahme bei Photovolta- ikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Fehlende Zuverlässig- keit der Energieversor- gung	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
			chancen- reich	chancen- arm	chancen- reich	chancen- arm	
Bedarf an Heizenergie	Klimarisiko	gering	gering	gering	mittel	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Tabelle 38: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

	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	gering-mittel	gering	mittel	mittel	ja
		mittel-hoch	mittel			

Tabelle 39: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegen- wart	2031-2060		2020- 2030	2031-2060			
		optimis- tisch	pessimis- tisch		optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit An- passung	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering

3.5 Quellenverzeichnis

- AG Energiebilanzen e.V. (AGEB) (Hrsg.) (2014): Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2013 nach Energieträgern. Studie im Auftrag der RWE AG.
- 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.
- Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Amado, J.-C. (2016): Cooling for Thermal Generation in a Changing Climate. Case Study presented to Climate Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada. Ouranos.
- Andrić, I.; Pina, A.; Ferrão, P.; Fournier, J.; Lacarrière, B.; Le Corre, O. (2017): The impact of climate change on building heat demand in different climate types. *Energy and Buildings* 149, S. 225–234. doi:10.1016/j.enbuild.2017.05.047.
- Auerbach, M.; Ebner von Eschenbach, A.-D.; Eichler, D.; Gersdorf, F.; Kaspar, F.; Majewski, D.; Niemann, D.; Schima, B.; Streek, P. (2020): Einsatzpotenziale erneuerbarer Energien für Verkehr und Infrastruktur verstärkt erschließen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 5 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016 - 2019, Berlin.
- Bardt, H.; Biebeler, H.; Haas, H. (2013a): Einfluss des Klimawandels auf die deutsche Energieversorgung. *Wirtschaftsdienst* 93 (5/2013), S. 307–314. doi:10.1007/s10273-013-1526-0.
- Bardt, H.; Biebeler, H.; Haas, H. (2013b): Impact of Climate Change on the Power Supply in France, Germany, Norway and Poland: A Study Based on the IWC Climate Risk Indicator. CESifo Forum 4.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (Hrsg.) (2015): Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten, München.
- Bernhofer, C.; Matschullat, J.; Bobeth, A. (Hrsg.) (2011): Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden. Rhombos Verl., Berlin.
- 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.
- Bieritz, L. (2015): Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft. Welche Folgen hat die Erwärmung auf die Energieerzeugung und -verteilung? GWS, Osnabrück.
- Birkmann, J.; Schanze, J.; Müller, P.; Stock, M. (Hrsg.) (2012): Anpassung an den Klimawandel durch räumliche Planung. Grundlagen, Strategien, Instrumente. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.
- Bonjean Stanton, M. C.; Dessai, S.; Paavola, J. (2016): A systematic review of the impacts of climate variability and change on electricity systems in Europe. *Energy* 109, S. 1148–1159. doi:10.1016/j.energy.2016.05.015.
- Brunner, C. U.; Steinemann, U.; Nipkow, J. (2007): Bauen, wenn das Klima wärmer wird. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Zürich.
- Büchner, M.; Gerstengarbe, F.-W.; Gottschalk, P.; Gutsch, M.; Hattermann, F. F.; Huang, S.; Koch, H.; Lasch, P.; Lüttger, A.; Schellnhuber, H. J.; Suckow, F.; Tiggemann, D.; Wechsung, F.; Werner, P. C. (2013): Klimafolgen für Deutschland. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK), Potsdam.
- 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 Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2019): Stromausfall. Vorsorge und Selbsthilfe, Bonn.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.) (2019): BGR Energiestudie 2018. Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung (22), Hannover.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2017): Germany's Seventh National Communication on Climate Change. A report under the United Nations Framework Convention on Climate Change, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2019a): Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Ausgabe 2019, Frankfurt am Main.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2019b): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (o.J.): Erneuerbare Energien. Download unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>. Stand: 30.08.2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (o.J.): Mineralöl und Kraftstoffe. Download unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/mineraloelversorgung.html>. Stand: 06.02.2020.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2011): Evaluierung möglicher Anpassungsmaßnahmen in den Sektoren Energie, Industrie, Mittelstand und Tourismus vor dem Hintergrund der Erarbeitung eines „Aktionsplans Anpassung“ der Bundesregierung, Düsseldorf, Berlin, Wuppertal.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2015a): Die Energie der Zukunft. Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2015b): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2015c): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand Kurzfassung, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2017): Die Energie der Zukunft. Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende - Berichtsjahr 2017. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2018a): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2018, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2018b): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2018, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019a). Konventionelle Energieträger - Kohle. Download unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/kohlepolitik.html>. Stand: 27.01.2020.

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

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019c): Energieeffizienzstrategie 2050, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019d): Rahmen und nächste Schritte für die Kohleaussieggsgesetzgebung.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Hrsg.) (2019): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2018. Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat).
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hrsg.) (2011): "Smart Grid" und "Smart Market". Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems, Bonn.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hrsg.) (2014): Informationen zum Netzausbau. Wissen, wo es lang geht!, Bonn.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hrsg.) (2015): Bedarfsermittlung 2024. Zusammenfassung der Konsultationsergebnisse, Bonn.
- Bundesnetzagentur (BNetzA); Bundeskartellamt (BKartA) (Hrsg.) (2016): Monitoringbericht 2016, Bonn.
- Bundesnetzagentur (BNetzA); Bundeskartellamt (BKartA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2018, Bonn.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (Hrsg.) (2019): Marktregeln für eine erfolgreiche Sektorkopplung, Berlin.
- Bundesverband WindEnergie (BWE) (2018): Jahrbuch Windenergie 2018. BWE Marktübersicht - Windmarkt, Technik und Service 28. Auflage. Bundesverband Windenergie, Berlin.
- Bunz, M. (2016): Psychosoziale Auswirkungen des Klimawandels. Psychosocial effects of climate change. UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst (02/2016), S. 30–37.
- Bürger, V.; Hesse, T.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P.; Quack, D. (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 - Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Ciscar, J.-C.; Dowling, P. (2014): Integrated assessment of climate impacts and adaptation in the energy sector. *Energy Economics* 46, S. 531–538. doi:10.1016/j.eneco.2014.07.003.
- Climate Service Center (CSC); Carbon Disclosure Project (CDP) (Hrsg.) (2013): Klimawandelvermeidung und Anpassung im Energiesektor Deutschland, Österreich und Schweiz. CDP & CSC Klimawandel Branchenfokus 2013, Hamburg, Berlin.
- Cortekar, J.; Groth, M. (2013): Der deutsche Energiesektor und seine mögliche Betroffenheit durch den Klimawandel. Synthese der bisherigen Aktivitäten und Erkenntnisse. CSC Report 14. Climate Service Center (CSC), Germany.
- Cradden, L. C.; Harrison, G. P. (2013): Adapting overhead lines to climate change: Are dynamic ratings the answer? *Energy Policy* 63, S. 197–206. doi:10.1016/j.enpol.2013.08.052.
- Cronin, J.; Anandarajah, G.; Dessens, O. (2018): Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. *Climatic Change* 151 (2), S. 79–93. doi:10.1007/s10584-018-2265-4.
- Crook, J. A.; Jones, L. A.; Forster, P. M.; Crook, R. (2011): Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy Environ. Sci.* 4 (9), S. 3101–3109. doi:10.1039/C1EE01495A.
- Demuth, B.; Heiland, S.; Luick, R.; Vedel, D.; Ammermann, K.; Wiersbinski, N. (2016): Die Energiewende im Spannungsfeld energiepolitischer Ziele, gesellschaftlicher Akzeptanz und naturschutzfachlicher Anforderungen. Ergebnisse des gleichnamigen F+E-Vorhabens (FKZ 3515801800) des Bundesamtes für Naturschutz. BfN-Skripten 433. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (Hrsg.) (2003): Dokumentation von typischen Schäden und Beeinträchtigungen durch Hochwasserereignisse in der Gasversorgung, Ableitung von vorbeugenden und akuten Handlungsempfehlungen. Bericht - Revision 1, Leipzig.
- Ebinger, J. O.; Vergara, W. (2011): Climate impacts on energy systems. Key issues for energy sector adaptation. World Bank, Washington D.C.

EU - RL 2006/44/EG: EU-RL - Richtlinie 2006/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten vom 2006. Ursprünglich gefasst 2006.

European Commission (EC) (Hrsg.) (2011): Energy Roadmap 2050. Impact assessment and scenario analysis, Brüssel.

European Environment Agency (EEA) (2016): Heating and cooling degree days, Kopenhagen.

Foken, U. (2003): Leistungsvorhersage räumlich verteilter Windkraftanlagen unter besonderer Berücksichtigung der thermischen Schichtung der Atmosphäre Volume 503. VDI Verlag,

Fraunhofer ISI (Hrsg.) (2018): Sektorkopplung – Definition, Chancen und Herausforderungen. Working Paper Sustainability and Innovation, Karlsruhe.

Gaetani, M.; Huld, T.; Vignati, E.; Monforti-Ferrario, F.; Dosio, A.; Raes, F. (2014): The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments. Renewable and Sustainable Energy Reviews 38, S. 706–716. doi:10.1016/j.rser.2014.07.041.

Gas- und Umwelttechnik GmbH (2003): Dokumentation von typischen Schäden und Beeinträchtigungen durch Hochwasserereignisse in der Gasversorgung, Ableitung von vorbeugenden und akuten Handlungsempfehlungen. Bericht - Revision 1.

Göbbling-Reisemann, S.; Bardt, H.; Biebeler, H.; Dördelmann, O.; Herrmann, A.; Stührmann, S.; Wachsmuth, J. (2012): Klimawandel: Regionale Verwundbarkeit der Energieversorgung in Deutschland. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 62 (4).

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.

Growitsch, C.; Malischek, R.; Nick, S.; Wetzel, H. (2014): The Costs of Power Interruptions in Germany: A Regional and Sectoral Analysis. German Econ Rev 16 (3), S. 307–323. doi:10.1111/geer.12054.

Grussmann, S.; Janke, J.; Schibany, A. (2014): Die wirtschaftlichen Kosten des Klimawandels in Österreich. Bundesministerium der Finanzen (BMF), Wien.

Hall, R.; Erdélyi, R.; Hanna, E.; Jones, J. M.; Scaife, A. A. (2015): Drivers of North Atlantic Polar Front jet stream variability. Int. J. Climatol. 35 (8), S. 1697–1720. doi:10.1002/joc.4121.

Heinrich, C.; Wittig, S.; Albring, P.; Richter, L.; Safarik, M.; Böhm, U.; Hantsch, A. (2014): Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie. Climate Change 25/2014. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Herrmann, A.; Mädlow, A.; Gross, U.; Krause, H. (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiebedarf von Gebäuden und den Ertrag erneuerbarer Energien. Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik; TU Bergakademie Freiberg, Graz.

Hoffmann, B.; Häfele, S.; Karl, U. (2013): Analysis of performance losses of thermal power plants in Germany – A System Dynamics model approach using data from regional climate modelling. Energy 49, S. 193–203. doi:10.1016/j.energy.2012.10.034.

Huneke, F.; Perez Linkenheil, C.; Niggemeier, M. (2017): Kalte Dunkelflaute. Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter. Greenpeace Energy AG.

Hüttenrauch, J.; Müller-Syring, G.; Krause, H. et al (2017): Integration fluktuierender erneuerbarer Energien durch konvergente Nutzung von Strom- und Gasnetzen - Konvergenz Strom- und Gasnetze (KonStGas).

Jerez, S.; Tobin, I.; Vautard, R.; Montávez, J. P.; López-Romero, J. M.; Thais, F.; Bartok, B.; Christensen, O. B.; Colette, A.; Déqué, M.; Nikulin, G.; Kotlarski, S.; van Meijgaard, E.; Teichmann, C.; Wild, M. (2015): The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. Nature communications 6. Aufsatznummer 10014. doi:10.1038/ncomms10014.

Koch, H.; Vögele, S. (2009): Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change. *Ecological Economics* 68 (7), S. 2031–2039. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.02.015.

Koch, H.; Vögele, S.; Kaltofen, M.; Grünewald, U. (2012): Trends in water demand and water availability for power plants—scenario analyses for the German capital Berlin. *Climatic Change* 110 (3-4), S. 879–899. doi:10.1007/s10584-011-0110-0.

Koch, M.; Hesse, T.; Kenkmann, T.; Bürger, V.; Haller, M.; Heinemann, C.; Vogel, M.; Bauknecht, D.; Flachsbarth, F.; Winger, C.; Wimmer, D.; Rausch, L.; Hermann, H. (2017): Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Freiburg.

Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (Hrsg.) (2018): Merkblatt: KfW-Programm Erneuerbare Energien "Speicher", Frankfurt am Main.

Kurth, S.; Breuer, J. (2018): Analyse zur Verwundbarkeit künftiger Stromnetze im Zuge der Energiewende. Arbeitspaket 7 im Vorhaben „Erhöhung der Transparenz über den Bedarf zum Ausbau der Strom-Übertragungsnetze“ gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Öko-Institut e.V., Freiburg.

Leyris, J.; Jansen, B. O.; Follum, O.-A.; Musdalslien, U. (2018): Greenhouse Gas Emissions Along the Norwegian Gas Value Chain. doi:10.2118/190587-MS.

Lück, L.; Ketov, M.; Unland, J.; Moser, A. (Hrsg.) (2017): Modellierung der Einspeisung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen für Strommarkt- und Netzbetriebssimulationen. 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (in Wien. Download unter https://www.researchgate.net/profile/Mihail_Ketov/publication/330902010_Modellierung_der_Einspeisung_von_Windenergie-_und_Photovoltaikanlagen_fur_Strommarkt-_und_Netzbetriebssimulationen/links/5c5ac21592851c48a9bdb57c/Modellierung-der-Einspeisung-von-Windenergie-und-Photovoltaikanlagen-fuer-Strommarkt-und-Netzbetriebssimulationen.pdf).

Madry, T. (2011): Klimawandel und Energiesysteme. Verwundbarkeit und Anpassungsoptionen der Energiewirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Wuppertal Inst. für Klima Umwelt Energie, Wuppertal.

Mahammadzadeh, M.; Biebeler, H. (2009): Anpassung an den Klimawandel. iw Analysen - Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln Nr. 57. IW-Analysen 57. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Köln.

Mideksa, T. K.; Kallbekken, S. (2010): The impact of climate change on the electricity market: A review. *Energy Policy* 38 (7), S. 3579–3585. doi:10.1016/j.enpol.2010.02.035.

Mima, S.; Criqui, P.; Watkiss, P. (2011): The Impacts and Economic Costs of Climate on Energy in Europe. Summary of Results from the EC RTD Climate Cost Project. In: P. Watkiss (Hrsg.) *The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Published by the Stockholm Environmental Institute.* Schweden.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) (Hrsg.) (2015): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern, Stuttgart.

Mücke, H.-G.; Matzarakis, A. (2019): Klimawandel und Gesundheit. Tipps für sommerliche Hitze und Hitzewellen. Deutscher Wetterdienst (DWD), Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Munich RE) (2019): Batterieleistung wird versicherbar – Innovative Leistungsdeckung von Munich Re unterstützt Energiewende. Download unter <https://www.munichre.com/de/unternehmen/media-relations/medieninformationen-und-unternehmensnachrichten/medieninformationen/2019/2019-03-07-batterieleistung-wird-versicherbar-innovative-leistungsdeckung-von-munich-re-unterstuetzt-energiewende.html>. Stand: 15.09.2020.

- 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.
- Olonscheck, M.; Holsten, A.; Kropp, J. P. (2011): Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. *Energy Policy* 39 (9), S. 4795–4806. doi:10.1016/j.enpol.2011.06.041.
- Patt, A.; Pfenninger, S.; Lilliestam, J. (2013): Vulnerability of solar energy infrastructure and output to climate change. *Climatic Change* 121 (1), S. 93–102. doi:10.1007/s10584-013-0887-0.
- Pechan, A.; Eisenack, K. (2014): The impact of heat waves on electricity spot markets. *Energy Economics* 43, S. 63–71. doi:10.1016/j.eneco.2014.02.006.
- 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.
- Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Cook, V.; Harthan, R. O.; Hermann, H.; Förster, H.; Greiner, B.; Jörß, W.; Loreck, C.; Ludig, S.; Kasten, P.; Matthes, F.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C.; Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Fleiter, T.; Schlomann, B.; Steinbach, J. (2018): *Politiksznarien für den Klimaschutz VII. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2035*, Dessau-Roßlau.
- 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*.
- Rothstein, B.; Müller, U.; Greis, S.; Schulz, J.; Scholten, A.; Nilson, E. (2008): Elektrizitätsproduktion im Kontext des Klimawandels. Auswirkungen der sich ändernden Wassertemperaturen und des sich verändernden Abflussverhaltens. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (10), S. 555–561.
- 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.
- Santamouris, M. (2014): On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings* 82, S. 100–113. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.022.
- Santamouris, M.; Cartalis, C.; Synnefa, A.; Kolokotsa, D. (2015): On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings* 98, S. 119–124. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.052.
- Schaeffer, R.; Szklo, A. S.; Pereira de Lucena, André Frossard; Moreira Cesar Borba, Bruno Soares; Pupo Nogueira, Larissa Pinheiro; Fleming, F. P.; Troccoli, A.; Harrison, M.; Boulahya, M. S. (2012): Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy* 38 (1), S. 1–12. doi:10.1016/j.energy.2011.11.056.
- Scheele, U.; Oberdörffer, J. (2011): *Transformation der Energiewirtschaft. Zur Raumrelevanz von Klimaschutz und Klimaanpassung. nordwest2050 - Werkstattbericht 12. Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH, Oldenburg.*
- Schettler-Köhler, H.-P.; Lawrenz, H.-P.; Voss, K.; Pfaffertott, J. (2007): *Energieeinsparung contra Behaglichkeit? Forschungen* 121. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn.
- Schiffer, H.-W. (2017): Germany's Energy Supply. *Z Energiewirtschaft* 41 (2), S. 75–85. doi:10.1007/s12398-017-0200-4.
- Schmidt-Curreli, J.; Knebel, A.; Lawrenz, L. (2016): *Energiewendeatlas Deutschland 2030*. Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Berlin.
- Schuchardt, B.; Wittig, S. (Hrsg.) (2012): *Vulnerabilität der Metropolregion Bremen-Oldenburg gegenüber dem Klimawandel (Synthesebericht)*.
- Sieber, J. (2013): Impacts of, and adaptation options to, extreme weather events and climate change concerning thermal power plants. *Climatic Change* 121 (1), S. 55–66. doi:10.1007/s10584-013-0915-0.

- Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B.; Leßmann, D.; Tils, R. von; Becker, C.; Hübner, S. (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 111/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Spinoni, J.; Antofie, T.; Barbosa, P.; Bihari, Z.; Lakatos, M.; Szalai, S.; Szentimrey, T.; Vogt, J. (2013): An overview of drought events in the Carpathian Region in 1961–2010. *Advances in Science & Research* (10), S. 21–32. doi:10.5194/asr-10-21-2013.
- Spinoni, J.; Vogt, J.; Barbosa, P. (2015): European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. *Int. J. Climatol.* 35 (1), S. 25–36. doi:10.1002/joc.3959.
- Spinoni, J.; Vogt, J. V.; Barbosa, P.; Dosio, A.; McCormick, N.; Bigano, A.; Füssel, H.-M. (2018): Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100. *Int. J. Climatol.* 38 (3), e191–e208. doi:10.1002/joc.5362.
- Stadt Crailsheim (Hrsg.) (2013): Klimaschutzkonzept Crailsheim. Stadtwerke Crailsheim GmbH; Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, Crailsheim.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018): Umwelt. Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserentsorgung 2016. Download unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/wasser-abwasser-nichtoeffentlich-2190220169004.pdf?__blob=publicationFile. Stand: 10.09.2019.
- Tripathi, A.; Aruna, M.; Murthy, C. (2017): Output Power Loss of Photovoltaic Panel Due to Dust and Temperature. *International Journal of Renewable Energy Research* Vol. 7 (No. 1), S. 439–442.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2011): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. *Energiewirtschaft*, 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) (Hrsg.) (2017): Indikatoren für die ökonomische Bedeutung von Wasser und Gewässern. Abschlussbericht, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019a): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2018, 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.) (2020): Projektinformation: Auswirkungen der Nutzung Erneuerbarer Energien auf den Wasserhaushalt – Analyse der Wasserentnahmen zur Kühlung, Dessau-Roßlau.
- Wachsmuth, J. (2013): How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a Metropolitan Region in Northwest Germany. *Energy* 58, S. 192–201. doi:10.1016/j.energy.2013.06.035.
- Ward, D. M. (2013): The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply. *Climatic Change* 121 (1), S. 103–113. doi:10.1007/s10584-013-0916-z.
- Weltenergierat (WEC) (Hrsg.) (2015): Klimawandel: Was er für die Energiewirtschaft bedeutet. Kernergebnisse aus dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC.
- Wild, M.; Folini, D.; Henschel, F.; Fischer, N.; Müller, B. (2015): Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy* 116, S. 12–24. doi:10.1016/j.solener.2015.03.039.
- Wirth, H. (2020): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE, Freiburg.

Zhou, B.; Rybski, D.; Kropp, J. P. (2013): On the statistics of urban heat island intensity. *Geophys. Res. Let.* 40 (20), S. 5486–5491. doi:10.1002/2013GL057320.

Zhou, Q.; Hanasaki, N.; Fujimori, S. (2018): Economic Consequences of Cooling Water Insufficiency in the Thermal Power Sector under Climate Change Scenarios. *Energies* 11 (10), S. 2686. doi:10.3390/en11102686.

4 Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur

Autoren: Maike Voß, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin
Enno Nilson | Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Elisabeth Rudolph | Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Anne-Farina Lohrengel | Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

4.1 Ausgangslage

4.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Ein leistungsfähiger Verkehrssektor ist für die Mobilität von Gütern und Personen von großer Bedeutung. Eine gute Verkehrsinfrastruktur trägt zur Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft bei und ist ein wichtiger Standortfaktor für Deutschland (BMVI 2016a; Destatis 2018).

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ werden die Verkehrsträger Straße, Schiene, Wasserstraße und Luftverkehr betrachtet. Im Straßen-, Schienen-, Flug- und Schiffsverkehr werden sowohl Güter wie auch Personen transportiert.

Das Straßennetz in Deutschland betrug im Jahr 2020 rund 830.000 Kilometer, davon 51.033 Kilometer an Bundesfernstraßen (BMVI 2020). 72 Prozent (479 Milliarden Tonnenkilometer) der Transportleistung des Güterverkehrs wurden im Jahr 2017 über die Straße transportiert (Destatis 2018). Für 2030 wird im Bundesverkehrswegeplan mit einer Zunahme der Transportleistung im Straßengüterverkehr um 38,9 Prozent im Vergleich zu 2010 gerechnet (BMVI 2016a). Die Anzahl der beförderten Personen im Straßenverkehr (motorisierter Individualverkehr und Straßenpersonenverkehr) betrug im Jahr 2017 rund 61,2 Milliarden Personen, davon knapp 58,2 Milliarden Personen allein im motorisierten Individualverkehr (BMVI 2018b).

Das deutsche Schienennetz hatte 2017 eine Streckenlänge von rund 38.600 Kilometern. Die Personenbeförderung ist seit 2005 stetig gewachsen. Im Jahr 2017 wurden knapp 2,8 Milliarden Personen auf der Schiene befördert (Destatis 2019). Bis 2030 wird mit einem Anstieg des Personenverkehrsaufkommens im Eisenbahnverkehr um 6,9 Prozent im Vergleich zu 2010 gerechnet (BMVI 2016a). Auch das Güterverkehrsaufkommen im Schienenverkehr hat stetig zugenommen und lag 2018 bei knapp 405 Millionen Tonnen (BMVI 2019). Die Verkehrsverflechtungsprognose rechnet bis zum Jahr 2030 mit einem Anstieg des Güterverkehrsaufkommens auf der Schiene um 23,6 Prozent und einem Anstieg der Schienengüterverkehrsleistung um 42,9 Prozent (Schubert et al. 2014).

Die Bundeswasserstraßen in Deutschland umfassen ein Netz von knapp 7.300 Kilometer an Binnenwasserstraßen und 23.000 Quadratkilometer Seewasserstraßen (WSV und GDWS o.J.; BMVI 2019). Die transportierte Gütermenge in der Binnenschifffahrt ist zwischen 2002 und 2017 geringfügig zurückgegangen (von circa 230 auf 220 Millionen Tonnen). Das Niedrigwasserjahr 2018 zeigt mit knapp 200 Millionen Tonnen deutlich reduzierte Mengen (BAG 2019). Für die Seeschifffahrt wurden 2018 Transportmengen von knapp 295 Millionen Tonnen erreicht (BMVI 2019). Die Häfen mit den höchsten Umschlagsmengen waren der Hamburger Hafen mit 125,1 Millionen Tonnen, der Hafen Bremen-Bremerhaven mit 63,4 Millionen Tonnen sowie der Hafen Wilhelmshaven mit 21,2 Millionen Tonnen Güterumschlag (BMVI 2019). Im Seeschiffsverkehr wurden 2017 knapp 17 Millionen Personen befördert (Statistikportal 2020).

Im Luftverkehr werden vor allem Fracht und Luftpost sowie hochwertige Güter im In- und Ausland transportiert. Hier ist besonders der Handel mit dem Ausland von großer Bedeutung (Hütter 2016). Im Jahr 2017 wurden 0,1 Prozent der beförderten Güter (4,9 Millionen Tonnen) über den Luftverkehr transportiert und 213 Millionen Personen befördert.

Aufgrund seiner hohen Anfälligkeit für Schäden infolge von Extremwetterereignissen zählt der Verkehrssektor zu einem der potenziell am stärksten durch den Klimawandel betroffenen Handlungsfelder (Hänsel et al. 2020). Starkregenereignisse, Überschwemmungen, Stürme und Trockenperioden beeinträchtigen die Verkehrsinfrastruktur und können zu Unterbrechungen der Verkehrssysteme führen (Reusswig et al. 2016). Beschädigungen der Verkehrsinfrastruktur führen zu steigenden Instandhaltungskosten für die Baulastträger. Unterbrechungen und Beeinträchtigungen der Verkehrssysteme können sich auf die Verkehrssicherheit auswirken, Unternehmensprozesse beeinflussen und die persönliche Alltagsorganisation beeinträchtigen (Rotter et al. 2011b).

Das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ist mit vielen anderen Handlungsfeldern verknüpft und hat dementsprechend sowohl aus sozialer und ökonomischer Perspektive als auch aus Umweltsicht eine überaus hohe Bedeutung (Rotter et al. 2011b). Wechselwirkungen können besonders mit Klimawirkungen aus den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“, „Energiewirtschaft“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Menschliche Gesundheit“ auftreten. Durch die enge Verzahnung des Verkehrs mit verschiedenen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Funktionen ergeben sich potenziell weitreichende Auswirkungen von bestehenden Klimarisiken. Dies kann bei kritischen Infrastrukturen in Extremsituationen sogar zu Versorgungsengpässen oder Beeinträchtigungen der öffentlichen Sicherheit führen (Pechan et al. 2011; Rotter et al. 2011b).

Aufgrund der weitreichenden Auswirkungen des Klimawandels auf den Bereich Verkehr und Verkehrsinfrastrukturen, wird dieses Thema seit vielen Jahren intensiv erforscht. Seit 2016 wurde ihm ein eigenes Themenfeld im Rahmen des Expertennetzwerks des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gewidmet. Dabei werden Risiken ermittelt und die Vulnerabilität von Verkehr und Infrastruktur von Schiene, Straße und Wasserstraße bestimmt, um zu analysieren, ob und wie sich der Verkehrssektor an den Klimawandel und an extreme Wetterereignisse anpassen kann (BMVI 2018a; Hänsel et al. 2020).

4.1.2 Neuere Entwicklungen

Der Verkehrssektor ist von Entwicklungen gekennzeichnet, die mit den vielfältigen Funktionen der Verkehrsinfrastruktur zusammenhängen. Beispiele für zukünftige Entwicklungen sind die fortschreitende Elektrifizierung, die Digitalisierung und die Automatisierung im Straßen- Schienen- beziehungsweise Wasserstraßenverkehr, die kombinierte Nutzung verschiedener Verkehrsträger und die Gestaltung von umweltfreundlichen Verkehrskonzepten.

Für den Straßenverkehr wird das Thema der Elektromobilität in Zukunft eine große Rolle spielen. Im Zusammenhang mit den Klimazielen der Bundesregierung und der Ausgestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft, wird der Ausbau der Ladesäuleninfrastruktur weiter zunehmen (BMU 2019). Zudem ist geplant, bis 2050 den Anteil der Elektroautos auf deutschen Straßen stark zu erhöhen (BMU 2016; BMU 2019). Der Gütertransport auf der Straße war in den letzten Jahren vor allem von der Automatisierung geprägt (Schade et al. 2011). Weitere Investitionen in intelligente Verkehrssysteme sind vorgesehen (BMVI 2016a).

Der Schienenverkehr wird in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen, sowohl für den Personen- wie auch für den Gütertransport (Ickert et al. 2007; Agora Verkehrswende 2018). Ein Ausbau der Schienenverkehrsinfrastruktur bis 2030 ist im Bundesverkehrswegeplan vorgesehen. Im Gütertransport soll zudem eine Verlagerung von den Straßen auf die Schiene stattfinden (BMVI 2016a; BMU 2019). Auch im Personentransport sollen zukünftig Verkehrskonzepte

wie der Deutschlandtakt, also eine Taktverdichtung der Züge und eine Verkürzung der Umsteigezeiten, dazu dienen, den Personenverkehr durch Züge weiter ausbauen und für kürzere Reisezeiten sorgen (BMVI 2016a).

Die Bundeswasserstraßen sind von besonderer Bedeutung für den Transport von Massengütern und für den Schwerlastverkehr (BfG et al. 2015). Zukünftig wird die Digitalisierung auch die Entwicklung des Binnenschiff- und Seeschiffsverkehrs weiter vorantreiben. Informationsdienste und moderne Telematik werden Verkehrsabläufe der Schifffahrt weiter optimieren und Hafenanlagen werden zunehmend automatisiert (BMVI 2016a). Die Modernisierung der Binnenschifffahrt ist zudem Teil des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung (BMU 2019).

Eine optimierte Nutzung des Schienen- und Schiffsverkehrs zur umweltfreundlichen Gestaltung des Gütertransports wird mit der Entwicklung von Projekten des kombinierten Verkehrs angestrebt (BMVI 2016a). Im Personentransport wird eine möglichst flexible und effiziente Nutzung verschiedener Verkehrsmittel, die sogenannte multimodale Mobilität, in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen (Schade et al. 2011). Mit Blick auf die künftige Verkehrsinfrastruktur ist zusätzlich der Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs und der Radinfrastruktur von Bedeutung (BMU 2019). Beabsichtigt ist eine Erhöhung der Anteile dieser Verkehrsmittel im Modal Split²⁰ (Proff et al. 2012; Follmer und Gruschwitz 2019).

Die Folgen des Klimawandels können sich auf die geplanten Entwicklungen in unterschiedlichem Maße auswirken. So können ein künftiger Anstieg von Starkniederschlägen und die Auswirkungen von Stürmen und Trockenheitsperioden zu häufigeren Beeinträchtigungen im Straßen- und Schienenverkehr führen und somit Risiken im Güter- und Personentransport vergrößern. In der Schifffahrt können unter anderem dürrebedingte Niedrigwassersituationen, aber auch durch hochwasserbedingt ausgelöste Sperrungen zu Beeinträchtigungen in den Betriebsabläufen führen. Diese und andere Extremwetterereignisse werden daher zunehmend bei der Entwicklung zukünftiger Informations- und Warnsysteme berücksichtigt (BfG et al. 2015).

Auch der DAS-Monitoringbericht bildet die Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit der Bundeswasserstraßen durch Hoch- und Niedrigwasserereignisse sowie witterungsbedingte Straßenverkehrsunfälle durch Starkregenereignisse oder Stürme als wichtige bereits zu beobachtende Klimafolgen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ab (UBA 2019).

4.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Extreme Wetterereignisse wie Dürreperioden, Hitze, Hoch- und Niedrigwasserereignisse, Starkniederschläge, Hagel, Nebel, Schneefall und Eisgang beeinträchtigen die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. Als Folge davon kann die einwandfreie Nutzung von Verkehrsmitteln und Verkehrsinfrastrukturen eingeschränkt sein (Nilson et al. 2013; Hänsel et al. 2020).

Für die Verkehrsträger Straße und Schiene werden Schäden und Hindernisse durch Hochwasser und durch gravitative Massenbewegungen als intensive Klimawirkungen behandelt. Die Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen kann speziell durch außergewöhnlich hohe oder niedrige Wasserstände beeinträchtigt werden. Auch dies wird jeweils intensiv betrachtet. Neben den Binnenschifffahrtsstraßen ist auch die Seeschifffahrt zukünftig verstärkt den Folgen des Klimawandels, insbesondere des beschleunigten Anstiegs des Meeresspiegels, ausgesetzt. Darüber hinaus kann es, besonders in Verbindung mit Starkwinden, Starkniederschlägen oder Hitzeperioden, zu Schäden an Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen aber auch

²⁰ Als Modal Split wird die Aufteilung verschiedener Verkehrsmittel auf das Gesamttransportaufkommen bezeichnet (Follmer und Gruschwitz 2019).

an anderen Infrastrukturelementen wie Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen kommen. Diese Klimawirkungen werden extensiv bearbeitet. Im Handlungsfeld werden damit insgesamt vier Klimawirkungen intensiv und drei Klimawirkungen extensiv behandelt (Tabelle 40).

Tabelle 40: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)	Intensive Bearbeitung
Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Hochwasser)	Intensive Bearbeitung
Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen	Extensive Bearbeitung
Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)	Intensive Bearbeitung
Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (gravitative Massenbewegungen)	Intensive Bearbeitung
Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen	Extensive Bearbeitung
Schäden an Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen	Extensive Bearbeitung
Schäden an Fahrzeugen	Nicht ausgewählt
Innenraumklima von Fahrzeugen (insb. ÖPNV)	Nicht ausgewählt
Vereisung von Flugzeugen	Nicht ausgewählt
Brandgefahr in Straßen- und Schienennähe	Nicht ausgewählt
Unfallgefahr	Nicht ausgewählt
Schäden an Bahnhöfen und Flughäfen	Nicht ausgewählt

4.2 Klimawirkungen im Detail

4.2.1 Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel wirkt sich aufgrund veränderter atmosphärischer Zirkulationsmuster (Windfelder, Wetterlagen im Binnen- und Küstenbereich) und Wasserhaushaltsgrößen (Niederschlagsmenge und -art sowie verdunstungssteuernde Größen im Binnenbereich) auf die Intensität, Häufigkeit und Dauer von Niedrigwasserereignissen von Flüssen aus. Entsprechende Zusammenhänge wurden und werden beispielsweise im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes untersucht (Nilson et al. 2020).

Bei geringen Abflüssen in Oberflächengewässern stellen sich an den davon betroffenen Wasserstraßen niedrige Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten ein. Es können sich Engpässe für die Schifffahrt ergeben. Die Engpässe bestehen in einer Reduktion der für die Schifffahrt verfügbaren Tiefe und Breite des Gewässers und dadurch der nutzbaren Ladungskapazität der Schiffe (siehe „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“). Die Befahrbarkeit einer Bundeswasserstraße wird nach den Kriterien der Sicherheit und Leichtigkeit bewertet.

Die „Sicherheit“ der Schifffahrt in einem begrenzten Gewässerquerschnitt ist umgekehrt proportional zur Wahrscheinlichkeit einer Havarie zum Beispiel durch Grundberührung oder Kollision mit Ufer und anderen Schiffen. Die Wahrscheinlichkeit einer Havarie nimmt unter anderem mit der Verringerung der zur Verfügung stehenden Fahrwassertiefe und Fahrwasserbreite zu und ist auch abhängig von den nautischen Fähigkeiten des Schiffsführers. Daher lässt sich die Sicherheit zum Beispiel aus dem Verhältnis zwischen fahrdynamischem Tiefgang²¹ und verfügbarer Wassertiefe oder zwischen erforderlicher Fahrwasserbreite und verfügbarer Breite ableiten.

Die „Leichtigkeit“ bestimmt den Aufwand eines Schiffsführers beim Durchfahren eines Gewässerabschnitts und damit den Verkehrsfluss in diesem Gewässerabschnitt. Wird die Leichtigkeit eingeschränkt, ist ein schnelles und effizientes Durchfahren eines Gewässerabschnittes nicht mehr möglich. Besonders durch eingeschränkte Möglichkeiten zum Begegnen und Überholen wird der Verkehrsfluss behindert.

Grundsätzlich herrscht das Bestreben vor, Größenvorteile der Schiffe (nach dem Prinzip der „economies of scale“) bestmöglich auszunutzen, das heißt mit großen Schiffskörpern möglichst viel Ladung auf einmal zu transportieren. Die Verringerung der Transportkapazität der Schiffe und eine Erhöhung der Transportzeiten in Niedrigwassersituationen hat bei gleichbleibenden „Fixkosten“ wie beispielsweise Personalkosten negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Die Flottenkonstellationen im Binnenbereich sind so gelagert, dass stellenweise, zum Beispiel am Mittelrhein, bereits oberhalb des Mittelwassers durch Tiefenengstellen und/oder Breitenengstellen Abladebeschränkungen hinzunehmen sind, welche zuerst die größeren Schiffe betreffen. Eine niedrigwasserbedingte Schifffahrtssperre gibt es im Unterschied zum Hochwasser nicht (siehe 4.2.2). Bei extrem niedrigen Fahrwassertiefen kann der Schiffstransport jedoch unwirtschaftlich werden.

Der Rhein ist die wichtigste Binnenschifffahrtsstraße Europas, wobei das Güteraufkommen auf dem Nieder- und Mittelrhein besonders hoch ist. Jedoch können auch andere Bundeswasserstraßenabschnitte von hoher wirtschaftlicher Relevanz sein, da das Binnenschiff für besonders

²¹ Der fahrdynamische Tiefgang setzt sich aus der Abladetiefe und dem fahrdynamischen Absinken (Squat) zusammen (BMVI 2005).

große Ladungsmengen oder -abmessungen oft die günstigste beziehungsweise einzige Transportmöglichkeit darstellt.

Für schifffahrtsbetreibende und -nutzende Unternehmen sind niedrigwasserbedingte Tiefenengpässe und damit verbundene Abladebeschränkungen aufgrund der längeren Andauer oft relevanter als hochwasserbedingte Einschränkungen. Die Beschränkungen haben in einzelnen Jahren über einhundert Tage andauert (BfG 2020). Vorhandenen Pufferkapazitäten der verladenden Unternehmen waren in diesen Fällen teilweise nicht ausreichend.

Im Binnenbereich besteht traditionell eine Abhängigkeit des produzierenden Gewerbes vom wasserstraßengebundenen Transport trockener oder flüssiger Massengüter (BAG 2019). Auf diese Weise setzt sich die beschriebene Wirkungskette im Handlungsfeld "Industrie und Gewerbe" fort. So war das extreme Niedrigwasserjahr 2018 auch in makroökonomischen Indikatoren feststellbar (Ademmer et al. 2018).

Mehrere Forschungsprojekte haben Hinweise geliefert, dass Niedrigwassersituationen an Binnenschifffahrtsstraßen unter den Rahmenbedingungen des zukünftigen Klimawandels häufiger und intensiver werden könnten (Nilson et al. 2014; Nilson et al. 2020).

Grundlage der Operationalisierung

Die Auswertungen zu den Einflüssen des Klimawandels auf das Wasserstraßenmanagement sowie die Schifffahrt beruhen auf projizierten Zeitreihen täglicher Abflüsse. Diese wurden mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen für das RCP8.5-Szenario in einem fünf mal fünf Kilometer Raster simuliert (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Als Indikator wird hier die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Abflüssen unter einem niedrigwasserbezogenen Schwellenwert verwendet. Als Schwellenwert wird ein Abfluss gewählt, der im Bezugszeitraum 1971 bis 2000 an circa 20 Tagen pro Jahr unterschritten wird (Q20 der Bezugsperiode 1971 bis 2000, $Q_{20,1971-2000}$). Der Wasserstand, der sich bei diesem Abfluss einstellt, ähnelt dem für das Wasserstraßenmanagement relevanten Bezugswasserstand GIW20 ("Gleichwertiger Wasserstand") beziehungsweise RNW ("Regulierungsniedrigwasserstand", Donau). Bei diesen Bezugswasserständen, die im statistischen Mittel an 20 (eisfreien) Tagen pro Jahr unterschritten werden, ist die Solltiefe der Fahrrinne noch garantiert. Für die Transporteinschränkungen sind darüber hinaus die Eigenschaften der auf den jeweiligen Flussabschnitten üblicherweise verkehrenden Schiffstypen und -flotten relevant (Nilson et al. 2020). Dieser Aspekt wird exemplarisch für den Rhein in der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warentransports über Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ aufgegriffen.

Dargestellt wird die Anzahl von Unterschreitungstagen des Schwellenwertes $Q_{20,1971-2000}$ (*Indikatoren-ID: VE-KL-01²²*). Die Karte für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 zeigt somit definitionsgemäß an allen Flussabschnitten eine Unterschreitung an 20 Tagen pro Jahr. Änderungen in den Zukunftsperioden (2031 bis 2060 beziehungsweise 2071 bis 2100) werden nur in Richtung einer Zunahme der Anzahl von Schwellenwertunterschreitungen gezeigt, da nur in diesen Fällen von einer höheren Betroffenheit des Binnenschiffstransports auszugehen ist. Die Darstellung umfasst das Netz der Binnenschifffahrtsstraßen mit Ausnahme der Kanalstrecken und der Oder. Das Abflussgeschehen der Schifffahrtskanäle ist das Ergebnis der Bewirtschaftung und hängt nur marginal mit den naturräumlichen Rahmenbedingungen zusammen, ist also nur wenig klimasensitiv. Das Einzugsgebiet der Oder liegt überwiegend in Polen und nur zu einem sehr geringen Anteil auf deutschem Gebiet. Dieses Gebiet konnte mangels Daten in der aktuellen Analyse (noch) nicht berücksichtigt werden.

²² Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Für den Bezugszeitraum wird bei allen betrachteten Wasserstraßen der Schwellenwert definitionsgemäß im Mittel an 20 Tagen pro Jahr unterschritten (Abbildung 9).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für den optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) sind für die Mitte des Jahrhunderts kaum relevante Veränderungen im Vergleich zum Bezugszeitraum festzustellen (Abbildung 9). Am Mittel- und Niederrhein bis hin zur niederländischen Grenze und an der Mosel werden im Mittel 20 bis 28 Tage unter dem Schwellenwert projiziert. Für die restlichen Wasserstraßen lässt sich keine Zunahme der Tage unterhalb des Schwellenwerts erkennen.

Eine generelle Zunahme der Tage unter dem Schwellenwert lässt sich dagegen für den pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) feststellen. Die meisten Wasserstraßen fallen unter diesen Bedingungen in die Klasse 20 bis 28 Tage. Etwas größere Veränderungen (28 bis 35 Unterschreitungstage) werden für Abschnitte der Mosel, des Neckars sowie den Rhein projiziert. Für den Main sind keine Änderungen gegenüber dem Bezugszeitraum zu verzeichnen.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Für das Ende des Jahrhunderts ist im optimistischen Fall nur für wenige Wasserstraßenabschnitte eine Erhöhung der Tage unter dem Schwellenwert erkennbar (Abbildung 9). Dies gilt für die Mosel sowie den Mittel- und Niederrhein, die überwiegend in die Klasse 20 bis 28 Unterschreitungstage fallen. Für die übrigen Wasserstraßen lassen sich keine Veränderungen feststellen.

Im pessimistischen Fall nimmt die Anzahl der Tage unter dem Schwellenwert deutlich zu. An den meisten Wasserstraßen (Elbe, die Weser, die Ems und Main) wird der Schwellenwert, der im Bezugszeitraum im langjährigen Mittel an 20 Tagen unterschritten wird, an 28 bis 35 Tagen unterschritten. Im Fokus liegen aber für diesen Indikator der Rhein und die Donau. Im pessimistischen Fall ergeben sich hier Schwellenwertunterschreitungen an 42 Tagen und mehr im Vergleich zu 20 Tagen im Bezugszeitraum.

Der gewählte Indikator zeigt, dass im Falle einer ungünstigen Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen (RCP8.5) und einer starken Antwort des Systems Klima-Wasserhaushalt-Wasserstraße (85. Perzentil des Ensembles) gegen Ende des 21. Jahrhunderts mit einer relevanten Zunahme schifffahrtsrelevanter Niedrigwassersituationen zu rechnen ist. Da die Einschränkungen für die verkehrlich wichtigen Bundeswasserstraßen Rhein und Donau besonders ausgeprägt wären, müsste ohne weitere Anpassung zumindest saisonal mit nennenswerten Auswirkungen auf die verladende Wirtschaft gerechnet werden.

Kernaussagen zu „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“

- ▶ Niedrigwassersituationen an deutschen Binnenschifffahrtsstraßen können in Zukunft verstärkt auftreten. Eine dadurch bedingte saisonale Verringerung der Transportkapazitäten kann unter ungünstigen Bedingungen nennenswerte Auswirkungen auf schifffahrtsnutzende Unternehmen haben.
- ▶ Für die Mitte des Jahrhunderts zeigt sich im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) mit 20 bis 28 Tagen keine deutliche Veränderung schifffahrtsrelevanter Niedrigwassersituationen. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) könnte der gewählte niedrige Schwellenwert an Rhein, Mosel und Teilabschnitten des Neckars an bis zu 35 Tagen unterschritten werden.
- ▶ Für das Ende des Jahrhunderts ist im optimistischen Fall an vielen Wasserstraßen ein moderater Anstieg der Unterschreitungstage zu verzeichnen. Im pessimistischen Fall werden an den meisten Wasserstraßen bis zu 35 Unterschreitungstage projiziert. An den verkehrswirtschaftlich besonders wichtigen Bundeswasserstraßen Rhein und Donau können Werte von 42 Tagen und mehr erreicht werden.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“

Aufgrund der durch Niedrigwassersituationen entstehenden Einschränkungen für schifffahrtsnutzende Unternehmen besteht ein enger Zusammenhang mit der Untersuchung der Anpassungskapazität der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs auf Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“. Auch Hochwassersituationen können zu Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen bis hin zu deren Sperrung im Fall einer Überschreitung des Höchsten Schifffahrtswasserstandes (HSW, HSW II) führen. Sie sind aber in der Regel von kürzerer Dauer (wenige Tage) als Niedrigwassersituationen und werden hinsichtlich der schifffahrtsbezogenen Anpassungsmöglichkeiten im vorliegenden Bericht nicht in den Fokus genommen.

Zu den Sensitivitätsfaktoren für die Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen bei Niedrigwasserereignissen zählen das Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein einer Stauhaltung der Wasserstraße, der Sedimenthaushalt und der Zustand des Gewässerbettes sowie die Tiefe und Breite des Gewässers beziehungsweise der Fahrrinne. Die räumliche Exposition wird durch die Lage der Binnenschifffahrtsstraßen geprägt. Besonders stark betroffen von zukünftigen schifffahrtsrelevanten Niedrigwassersituationen sind laut der oben dargestellten Projektionen Schifffahrtsstraßen wie der Rhein, die Donau, die Mosel und Teilabschnitte des Neckars. Prinzipiell sind frei fließende Gewässer stärker von Niedrigwasserphasen beeinträchtigt als staugeregelte Wasserstraßen (Nilson et al. 2020).

Eine niedrigwasserbezogene Anpassung der Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen kann sowohl bei der Flottenstruktur, der Schiffstechnik als auch bei einer flussbaulichen Optimierung der Wasserstraße ansetzen. Ein wichtiger Baustein zur Anpassung ist ferner die Pflege und Fortentwicklung von Vorhersagesystemen. Das frühzeitige Erkennen extremer Abflusssituationen ist für ein effektives Mittel- und Niedrigwassermanagement und die Transportplanung von hoher Bedeutung. Weitere auf den Binnenschifftransport bezogene Anpassungsmöglichkeiten bestehen im Bereich der Logistik (siehe „Beeinträchtigung des Warenverkehrs auf Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“).

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht die in Tabelle 42 genannten Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Anpassung der Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen beitragen und die Folgen von Niedrigwasserereignissen minimieren sollen:

Tabelle 42: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ 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. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
2.19	Themenfeld 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" im BMVI-Experten-Netzwerk	Wissen	Im Rahmen von Themenfeld 1 werden u.a. exemplarische Klimawirkungsanalysen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße durchgeführt. Die Klimawirkungsanalyse untersucht klimatische Einflüsse und Gefährdungspotenziale klimainduzierter Naturgefahren (u.a. Niedrigwasser) 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 (z. B. DAS-Basisdienst "Klima und Wasser")
1.14*	Operationelle Niedrig-/Mittelwasservorhersagen	Wissen	Die BfG entwickelt, pflegt und betreibt im Auftrag des BMVI und der WSV seit mehreren Jahrzehnten verkehrsbezogene Vorhersagemodelle und -systeme für die Binnenwasserstraßen. Diese sind in Zusammenarbeit mit der WSV im operationellen Einsatz, die Daten werden über das System ELWIS bereitgestellt. Diese Aufgabe wurde für den Rhein auch im Aktionsplan Niedrigwasser Rhein beschrieben.
1.16	Weiterentwicklung der Wasserstandsvorhersage	Wissen	Für ein effektives Mittel- und Niedrigwassermanagement ist das frühzeitige Erkennen der Abflusssituation von Bedeutung. Nur so können vorbeugende Maßnahmen wie der gesteuerte Wasserrückhalt oder eine Regulierung des Wasserstands rechtzeitig vorgenommen werden. Wasser(mengen)informationen sind eine zentrale Größe in vielen Wirkungsketten. Ein Fokus sollte hier in a) der Erstellung probabilistischer Vorhersageprodukte und b) einer Verlängerung des Vorhersagezeitraumes liegen. Diese Aufgabe wurde für den Rhein auch im Aktionsplan Niedrigwasser Rhein beschrieben.
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 Nebenflüssen begegnet werden soll. Der Aktionsplan "Niedrigwasser

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
		Motivation und Akzeptanz; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Rhein" wurde gemeinsam mit Vertretern großer Industrieunternehmen im Rheineinzugsgebiet und des Binnenschiffahrtsgewerbes entwickelt, um zuverlässig kalkulierbare Transportbedingungen am Rhein sicherzustellen. 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 Maßnahmen-gesetz 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 niedrigwassergeeigneter 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.
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 (z. B. 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.

Die systematische Berücksichtigung des Klimawandels bei der Maßnahmenplanung an Bundeswasserstraßen ist bereits weit fortgeschritten. So wird zusätzlich zu den in der Tabelle genannten Maßnahmen, für alle wasserstraßenbezogenen Maßnahmen in Deutschland ein sogenanntes Climate Proofing durchgeführt (APA III: 2.5 – 2.18). Dieses etabliert die Analyse von Klimawandelfolgen wie Niedrigwasserereignissen und den Erfordernissen zur Anpassung auf verschiedenen Handlungsebenen als eine der Grundlagen der Planungsprozesse der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV 2019; Norpoth et al. 2020).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die beschlossenen Maßnahmen an die Klimawirkung größtenteils in den Dimensionen „Wissen“ und „Technologie und natürliche Ressourcen“ ansetzt. Der Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“ (APA III: 5.4) enthält ein Portfolio von acht Maßnahmen, die die Anpassungsdimensionen „Wissen“, „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Motivation und Akzeptanz“ und „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ abdecken (Tabelle 42).

Neben der Relevanz der sechs Anpassungsdimensionen ist zudem das Synergiepotenzial von Anpassungsmaßnahmen von hoher Bedeutung. Zusätzlich zu der Funktion der Klimaanpassung sind auch Wirtschaftlichkeitsabwägungen und Auswirkungen auf andere Sektoren, wie zum Beispiel die Gewässerökologie und die biologische Vielfalt, entscheidend für die Auswahl beschlossener Maßnahmen (BBSR 2016).

Grundsätzlich ist zu beachten, dass bei der Umsetzung der aufgeführten Maßnahmen die spezifischen Charakteristika der jeweiligen Wasserstraßengebiete berücksichtigt werden müssen. Die Auswirkungen des Klimawandels sowie die verkehrlichen Rahmenbedingungen unterscheiden sich bei den einzelnen Wasserstraßen Deutschlands deutlich. Zudem wirken die einzelnen Maßnahmen auf unterschiedliche Weisen und haben nicht in allen Fällen für alle Wasserstraßengebiete den gleichen Konkretisierungsgrad (wie zum Beispiel der Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“).

Weiterreichende Anpassung

Die Aufrechterhaltung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt ist Aufgabe des Bundes. Viele Maßnahmen sind daher bereits im APA III und somit im vorangehenden Abschnitt genannt. Eine weiterreichende Anpassung kann einerseits durch einen höheren Umsetzungsgrad dieser Maßnahmen erreicht werden, andererseits sind auch darüberhinausgehende Maßnahmen möglich. Diese schließen vor allem Bereiche ein, in denen der Bund zwar Impulsgeber sein kann, die bezüglich einer Umsetzung aber vor allem in den Händen der verladenden und transportierenden Wirtschaft liegen. Dies bezieht sich zum Beispiel auf die Anpassung von Transportkonzepten (siehe „Beeinträchtigung des Warenverkehrs auf Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“) und die Optimierung von Transport- und Ladungsgefäßen. Auch bezüglich des Einsatzes kleinerer Schiffsgefäße unter den Rahmenbedingungen des Klimawandels kann der Bund informieren und Wissen aufbereiten. Die Anpassung der Schiffsflotte, zum Beispiel durch weitergehende Anpassung der Schiffstechnik und -größe, obliegt jedoch der Verantwortung der jeweiligen Unternehmen (WSV 2007; Nilson et al. 2014; LAWA 2017).

Weitere Optionen sind im Bereich der Wasserbewirtschaftung denkbar (BfG et al. 2015; Rothstein und Scholten 2016; BLfU 2017; LAWA 2017; Norpoth et al. 2020). Ein angepasstes Niedrigwassermanagement erfordert die Kooperation mit vielen anderen Akteuren und die Berücksichtigung der vielfältigen Nutzungsansprüche an die Ressource Wasser.

Tabelle 43: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ²³	Charakteristika
Finanzielle Anpassungsinstrumente: - Finanzielle Anreize für Schiffseigentümer und Binnenschifffahrtsunternehmen zur Anschaffung von angepassten Schiffskonstruktionen - Anpassung der Kreditvergabe-Richtlinien für Schiffskredite zur erleichterten Finanzierung von kleinen Schiffseinheiten (Rothstein und Scholten 2014)	Finanzielle Ressourcen	Unterstützung der finanziellen Kapazitäten von Binnenschifffahrtsunternehmen zur Anschaffung angepasster Schiffskonstruktionen oder kleineren Schiffseinheiten (Rothstein und Scholten 2014; Rothstein und Scholten 2016)	Bund	
Flussbauliche Maßnahmen: - Angepasste Fahrrinnenunterhaltung; Schaffung von Niedrigwasserkorridoren (Schröder und Wurms 2014; BfG et al. 2015; BLfU 2017; Nilson et al. 2020) - Angepasstes Sedimentmanagement (Kofalk et al. 2014; BfG et al. 2015; BLfU 2017; LAWA 2017)	Technologie und natürliche Ressourcen	Binnenschifffahrtsstraßen für Niedrigwasserperioden schiffbar zu halten, unterhaltbar und zukunftstauglich machen	Infrastrukturbetreiber; Nutzer und Anrainer von Infrastrukturen; Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung und -ämter; Bundesoberbehörden	Erfordert höheren Investitionsbedarf; Vereinbarkeit mit den Umweltqualitätszielen der EU-Wasserrahmenrichtlinie ist bei der Planung zu berücksichtigen, da ggf. Zielkonflikte auftreten können (Kofalk et al. 2014)
Anpassung der Wasserbewirtschaftung: - Verstärkte Regelungen/Einschränkungen von Wassernutzungen im Niedrigwasserfall (BLfU 2017; Stölzle et al. 2018) - Angepasster Bemesungsansatz für Speicher und andere wasserwirtschaftliche Anlagen (BLfU 2017) - Überleitungen aus Gewässern mit hohem Darlehen (BLfU 2017)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Deckung des Wasserbedarfs in Niedrigwasserphasen (Rothstein und Scholten 2016; BLfU 2017; Stölzle et al. 2018); Berücksichtigung der Entwicklung von Niedrigwasserkennwerten; Stützung der Schifffahrt in Niedrigwasserphasen	Bundesländer; Infrastrukturbetreiber; Nutzer und Anrainer von Infrastrukturen	Mögliche Zielkonflikte mit Maßnahmen des Naturschutzes

Die aufgezeigten Optionen der weiterreichenden Anpassung erreichen ihre Grenzen, sofern die Maßnahmen die Interessen anderer Akteure im System Wasserstraße behindern oder den Natur- und Gewässerschutz in einem nicht vertretbaren Maße negativ beeinflussen (Stölzle et al.

²³ 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.

2018). Flussbauliche Maßnahmen werden, wie auch andere große Bau- und Infrastrukturvorhaben, im Rahmen von Teilhabeverfahren erörtert, um mögliche Auswirkungen der Baumaßnahme mit den beteiligten Akteuren und Betroffenen abzustimmen. Da flussbauliche Maßnahmen einen Eingriff in die Natur darstellen, können Zielkonflikte mit Naturschutz- oder Gewässerschutzmaßnahmen entstehen (Stölzle et al. 2018; Norpoth et al. 2020).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 44: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Verstärkte Raum- und Landschaftsplanung zur Retention und Wasserspeicherung (Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020) - Ausweisung von Vorranggebieten für den natürlichen Wasserrückhalt (BLfU 2017)
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Erkenntnisse über Vulnerabilitäten der Wasserstraßen, auch zur Vermeidung von Versorgungsengpässen in Niedrigwassersituationen, können zur Anpassung beitragen. - Beispiele aus Studien zu kritischen Infrastrukturen können helfen, um die Aus- und Überlastung von Wasserstraßen bei Niedrigwasserereignissen besser bestimmen zu können.

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Die Anpassungsdauer unterscheidet sich stark in Bezug auf die einzelnen Maßnahmen und Instrumente zur Anpassung an Niedrigwasserereignisse auf den Binnenschifffahrtsstraßen. Zusammenfassend und überschlägig wurde sie durch Vertreter des Behördennetzwerks mit bis zu 50 Jahren bewertet. Besonders im Bereich des Niedrigwassermanagements sind viele Akteure an der Planung und Umsetzung von Maßnahmen und Instrumenten beteiligt. Daraus ergeben sich längere Anpassungsdauern (Kofalk et al. 2014).

Tabelle 45: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Finanzielle Anpassungsinstrumente - Anpassung im Bereich der Wasserbewirtschaftung (teilweise Zeitspannen von < 10 Jahren für Maßnahmen bspw. zur Anpassung von Regelungen und Einschränkungen)
10-50 Jahre	- Flussbauliche Maßnahmen - Anpassung im Bereich der Wasserbewirtschaftung (teilweise Zeitspannen von 10-50 Jahren für Maßnahmen wie z. B. den Bau von Niedrigwasseraufhöhungen)

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Abflussprojektionen für den Niederrhein haben unter Annahme des RCP8.5-Szenarios für das Ende des Jahrhunderts ergeben, dass im Extremfall (15. Perzentil) ein klassisches Wasserstraßenmanagement in dem untersuchten Rheinabschnitt nicht mehr möglich sein könnte (Nilson et al. 2020). In diesem Fall wären weiterführende, transformative Anpassungsmöglichkeiten nötig. Hierzu könnten innovative flussbauliche Technologien gehören, wie zum Beispiel Klappbuhnen oder Schlauchwehre (Kofalk et al. 2014; Schröder und Wurms 2014). In der Literatur finden sich

ferner Gedanken zum Bau oder zur Erweiterung von Wasserspeichern zur Niedrigwasseraufhöhung (Rothstein und Scholten 2016; BLfU 2017; Stölzle et al. 2018).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 46: „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III) ²⁴			Weiterreichende Anpassung		Steige- rungspo- tenzial für 2071-2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	mittel	mittel-hoch	mittel	mittel-hoch	hoch	ja
Gewissheit	hoch	hoch				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die 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) auf „gering“ gesenkt werden.

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

Tabelle 47: „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“: 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	3	3	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits für die 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.

²⁴ Die hier für das Bundesgebiet und für das gesamte Maßnahmenpaket der beschlossenen Maßnahmen vorgenommene Einschätzung kann die spezifischen Charakteristika der einzelnen Wasserstraßengebiete nur unzureichend berücksichtigen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Wasserstraßen und deren verkehrliche Rahmenbedingungen sind teils sehr unterschiedlich. Daher können die aufgeführten beschlossenen Maßnahmen je nach Wasserstraße auch eine unterschiedliche Wirksamkeit entfalten. Dies gilt insbesondere für den Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“, welcher eine hohe Wirksamkeit, aufweist, sich teilweise jedoch auf den Rhein bezieht (zum Beispiel Punkt 5. „Abladeoptimierung am Mittel- & Niederrhein“). In der aggregierten Betrachtung der Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen für alle Wasserstraßen ergibt sich daher eine mittlere bis mittel-hohe Wirksamkeit.

4.2.2 Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Hochwasser)

Hintergrund und Stand der Forschung

Zu den in der Literatur häufig genannten Auswirkungen des Klimawandels in Mitteleuropa gehören häufigere, intensivere und gegebenenfalls länger andauernde Hochwasserereignisse im Binnenbereich (Feyen et al. 2012; Alfieri et al. 2015; Blöschl et al. 2019). Ursächlich sind hierbei Veränderungen des Wasserhaushaltes im Binnenbereich, unter anderem der Niederschlagsmenge und -art.

Durch die mit hohen Abflüssen einhergehenden hohen Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten können sich Einwirkungen auf die Wasserstraßeninfrastruktur sowie den Ablauf des Schiffsverkehrs ergeben. Verkehrlich relevant sind Hochwasserereignisse, die gewisse Schwellenwerte überschreiten. In Abhängigkeit von diesen Schwellenwerten wird im Fall der für die Binnenschiffahrtsstraßen definierten "Höchsten Schifffahrtswasserstände" (HSW beziehungsweise HSW-II) die Schifffahrt eingestellt (DonauSchPV 2018; RheinSchPV 2019; MoselSchPV 2019; BinSchStrO 2018). In einigen Wasserstraßenabschnitten werden weitere, tiefere Hochwassermarken ausgewiesen, die mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung für die Schifffahrt verbunden sind und die Navigation auf die Mitte der Fahrrinne beschränken (HSW-I). In der Regel sind Aspekte der Verkehrssicherheit, des Schutzes der ufernahen Bebauung und/oder Brückendurchfahrtshöhen ausschlaggebend für die Festlegung des höchsten Schifffahrtswasserstandes. Zusammenhänge von HSW-Überschreitungen mit dem Klimawandel wurden und werden im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes untersucht (Hänsel et al. 2020; Nilson et al. 2020).

Hohe Strömungsgeschwindigkeiten können über eine erhöhte Sohlschubspannung eine intensivierte Erosion sowie Sediment- und Morphodynamik bewirken, was sich letztlich in veränderten Baggermengen und -orten des Sedimentmanagements durch die Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes niederschlägt. Dieser Aspekt wird ebenso wie die möglichen Überflutungen von Hafenanlagen in der Klimawirkung „Schäden an Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen“ betrachtet. Die Darstellung beschränkt sich hier auf die Überschreitung hoher Schwellenwerte im Binnenbereich und die damit einhergehenden Schifffahrtseinschränkungen.

Schifffahrtseinschränkungen infolge der Überschreitung der höchsten Schifffahrtswasserstände sind im Mittel von deutlich kürzerer Dauer als niedrigwasserbedingte Einschränkungen (siehe 4.2.1). In extremen Fällen können knapp zwei Wochen erreicht werden, zum Beispiel während des Hochwassers 2013 an der Donau (Belz et al. 2014). Für die verladende Wirtschaft gelten Hochwasserereignisse im Vergleich zu Niedrigwassersituationen daher als weniger relevant.

Grundlage der Operationalisierung

Die Auswertungen zu den Einflüssen des Klimawandels auf hochwasserbedingte Schifffahrtseinschränkungen beruhen, wie auch die Auswertungen zu den niedrigwasserbedingten Schifffahrtseinschränkungen, auf projizierten Zeitreihen täglicher Abflüsse. Diese wurden mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen für das RCP8.5-Szenario in einem fünf mal fünf Kilometer Raster simuliert (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Als Indikator für hochwasserbedingte Schifffahrtseinschränkungen wird hier die mittlere jährliche Anzahl der Tage mit Abflüssen über einem hochwasserbezogenen Schwellenwert verwendet. Als Schwellenwert wird ein Abfluss gewählt, der im Bezugszeitraum 1971 bis 2000 im Mittel an circa vier Tagen pro Jahr überschritten wird (Q01 der Bezugsperiode 1971 bis 2000). Dieser Schwellenwert entspricht nicht dem Abfluss HSQ des offiziellen, für unterschiedliche flussabschnitte spezifischen Höchsten Schifffahrtswasserstandes (HSW/HSW-II), ab dem die Schifffahrt

gemäß der Polizei- und/oder Binnenschifffahrtsverordnungen eingestellt wird (DonauSchPV 2018; RheinSchPV 2019; MoselSchPV 2019; BinSchStrO 2018).

Entsprechende Auswertungen mit Bezug auf den tatsächlichen Abfluss bei Höchstem Schifffahrtswasserstand (HSW²⁵) finden sich exemplarisch für den Rhein bei Hänsel et al. (2020). An einzelnen Pegeln, wie dem Pegel Kaub/Rhein, kommt der hier gewählte Schwellenwert Q01₁₉₇₁₋₂₀₀₀ dem offiziellen HSQ-I nahe, bei dem Geschwindigkeits- und Fahrtbeschränkungen für die Schifffahrt gelten. An anderen Pegeln (zum Beispiel am Niederrhein) liegt er niedriger, so dass die Darstellung die Einschränkungen überzeichnet (Nilson et al. 2013). Insgesamt zeigt sich eine ähnliche Änderungscharakteristik bei beiden Schwellenwerten. Da hochwasserbedingte Einschränkungen der Binnenschifffahrt im Mittel deutlich kürzer und damit wirtschaftlich weniger relevant sind als niedrigwasserbedingte Einschränkungen (siehe 4.2.1) kann hier ein Näherungswert genügen.

Dargestellt wird die Anzahl von Überschreitungstagen des Schwellenwertes Q01₁₉₇₁₋₂₀₀₀ (*Indikatoren-ID: VE-KL-02²⁶*). Die Karte für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 zeigt somit definitionsgemäß an allen Flussabschnitten vier Tage. Änderungen in den Zukunftsperioden (2031 bis 2060 beziehungsweise 2071 bis 2100) werden nur in Richtung Zunahme gezeigt, da nur in diesen Fällen von einer höheren Betroffenheit des Binnenschiffstransports auszugehen ist.

Die Darstellung umfasst, wie auch bei der Operationalisierung der niedrigwasserbedingten Schifffahrtseinschränkungen, das Netz der Binnenschifffahrtsstraßen mit Ausnahme der Kanalstrecken. Ferner fehlt auch hier die Darstellung der Oder.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Für den Bezugszeitraum wird bei allen betrachteten Wasserstraßen der Schwellenwert definitionsgemäß im Mittel an rund vier Tagen pro Jahr überschritten (Abbildung 10).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für die Mitte des Jahrhunderts sind im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) kaum Veränderungen der Tage über dem Schwellenwert zu verzeichnen (Abbildung 10). Geringfügige Zunahmen der Schwellenwertüberschreitungen auf fünf bis sieben Tage werden für den Rhein zwischen Mainz und Koblenz, für die Ems und die Havel projiziert.

Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) ergeben sich für fast alle dargestellten Wasserstraßen sieben bis 14 Überschreitungstage. Ausgenommen hiervon sind der Neckar, die Mosel und die Donau unterhalb der Inn-Mündung.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Für die meisten Wasserstraßen ist im optimistischen Fall auch für das Ende des Jahrhunderts mit geringen Änderungen zu rechnen (Abbildung 10). Ein moderater Anstieg auf fünf bis sieben Tage über dem Schwellenwert ergeben sich für den Mittel- und Niederrhein sowie für die Elbe ab der sächsischen Landesgrenze.

Für den pessimistischen Fall erhöht sich die Anzahl der Tage über dem Schwellenwert an allen Wasserstraßen. Zumeist ergeben sich Überschreitungen an sieben bis 14 Tagen, einzelne Abschnitte, zum Beispiel an der Elbe, fallen jedoch auch in die Klasse 14 bis 21 Überschreitungstage. Vereinzelte Streckenabschnitte im Wasserstraßennetz um Berlin, die noch höhere Werte aufweisen, sollten aus Sicht der Schifffahrt nicht überinterpretiert werden, da die umfangreichen

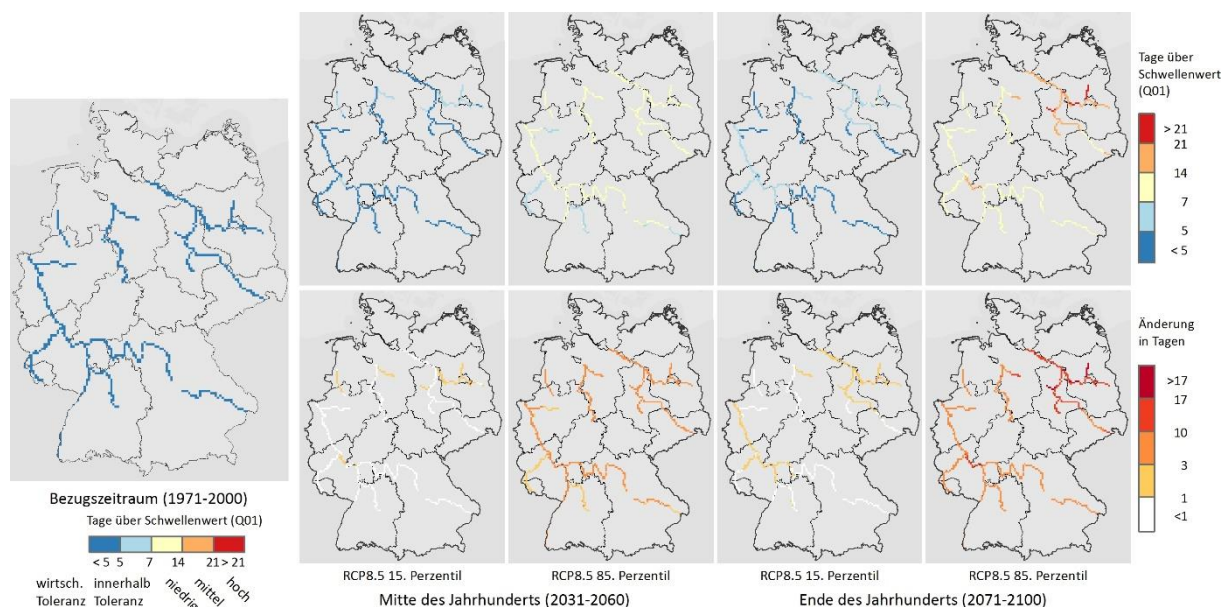
²⁵ Beziehungsweise dem entsprechenden Abfluss HSQ.

²⁶ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen in diesem Bereich nicht im Detail im verwendeten Modellsatz abgebildet sind.

Unter Annahme ungünstiger Entwicklungen hinsichtlich der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen (RCP8.5) und einer relativ starken Reaktion des Systems Klima-Wasserhaushalt-Wasserstraße (85. Perzentil des Ensembles) ergeben sich deutliche Zunahmen der Tage mit Abflüssen oberhalb der gewählten Schwellenwerte. Obgleich die Auswertung Hinweise auf generelle Entwicklungen hinsichtlich hochwasserbedingter Schifffahrtseinschränkungen gibt, muss bei der Interpretation berücksichtigt werden, dass der gewählte Schwellenwert an vielen Wasserstraßenabschnitten niedriger liegt als der mit dem tatsächlichen Höchsten Schifffahrtswasserstand (HSW beziehungsweise HSW-II) verbundene Abfluss. Die hochwasserbedingten Schifffahrtseinschränkungen werden daher überzeichnet. Auch in Zukunft werden hochwasserbedingte Einschränkungen der Binnenschifffahrt im Mittel deutlich kürzer sein als niedrigwasserbedingte Einschränkungen (siehe 4.2.1). Damit geht auch eine geringere wirtschaftliche Bedeutung einher.

Abbildung 10: Tage über dem Schwellenwert Q01 für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts (jeweils 15. und 85. Perzentil des RCP8.5) und Änderungswerte für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

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 jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 48: „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Hochwasser)“: 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 „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Hochwasser)“

- ▶ Hochwasserbedingte Schifffahrtseinschränkungen können an den deutschen Binnenschifffahrtsstraßen klimawandelbedingt in Zukunft zunehmen. Die Einschränkungen sind im Vergleich zu Niedrigwasserereignissen jedoch von kürzerer Dauer und haben eine geringere wirtschaftliche Bedeutung.
- ▶ Für die Mitte des Jahrhunderts werden im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) geringe Änderungen der Tage über dem hochwasserbezogenen Schwellenwert erwartet. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) steigt für fast alle Wasserstraßen der Wert auf bis zu 14 Tage über dem Schwellenwert.
- ▶ Auch für das Ende des Jahrhunderts werden im optimistischen Fall keine wesentlichen Änderungen projiziert. Im pessimistischen Fall ergeben sich gegenüber der Mitte des Jahrhunderts an den meisten Wasserstraßen keine weiteren Änderungen. Höhere Werte treten rechnerisch an einigen Wasserstraßen im Osten Deutschlands auf. Die Wirkung der dort installierten erheblichen Bewirtschaftungsmaßnahmen ist jedoch im verwendeten Modell nicht adäquat berücksichtigt.

4.2.3 Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Ästuarie von Elbe, Jade-Weser und Ems werden als Zufahrten zu den Seehäfen in Hamburg, Bremerhaven, Wilhelmshaven oder Emden genutzt. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat die Aufgabe, die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten. Um die tideunabhängige beziehungsweise tideabhängige Erreichbarkeit der Häfen für beispielsweise Containerschiffe über die Seeschifffahrtsstraßen sicher zu stellen, sorgt die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes durch Unterhaltungsmaßnahmen dafür, dass die planfestgestellten Fahrwassertiefen vorgehalten werden. Im Jahr 2020 konnten in der Elbe zum Beispiel Containerschiffe tideunabhängig, das heißt zu jeder Zeit, von und nach Hamburg verkehren, wenn sie einen Salzwassertiefgang von 12,50 Meter nicht überschreiten. Schiffe mit größeren Tiefgängen konnten Hamburg bei mittleren Tideverhältnissen nur tideabhängig, das heißt pro Tide in gewissen Zeitfenstern, erreichen und verlassen (WSV 2020).

Wasserstand, Strömung und Salzgehalt in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems werden bestimmt durch die Verhältnisse in der Nordsee, den Abfluss aus dem Binnenbereich sowie dem Wind über der Nordsee und den Ästuaren. Es wird erwartet, dass der Klimawandel unter anderem einen Meeresspiegelanstieg in der Nordsee, Änderungen im Oberwasserzufluss aus dem Binnenbereich oder veränderte Windverhältnisse über der Nordsee und den Ästuaren verursacht. Die in den Handlungsfeldern „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ vorgestellten Ergebnisse zeigen sowohl die Bandbreite des erwarteten Meeresspiegelanstieges und die Bandbreite der Änderungen im Abfluss, als auch, dass für mittlere und extreme Windverhältnisse bisher keine Änderungen festgestellt werden konnten. Veränderungen haben Auswirkungen auf die Befahrbarkeit und die Unterhaltung der Seeschifffahrtsstraßen. Aber auch Extremereignisse wie Sturmfluten (siehe „Sturmfluten“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) oder Sturmebben²⁷ führen zu Einschränkungen bei der Befahrbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen und der Nutzung der Häfen und ihrer Infrastruktur (HPA 2015).

Auf der Grundlage von Forschungsergebnissen aus Untersuchungen zum Klimawandel wurden die Bandbreite der zu erwartenden Änderungen der relevanten hydrologischen und meteorologischen Parameter wie des Meeresspiegels in der Nordsee, des Abflusses aus dem Binnenbereich oder des Windes über der Nordsee und den Ästuaren bestimmt (Church et al. 2013; Pörtner et al. 2019). Mit Sensitivitätsstudien, die klare Wenn-Dann-Aussagen ermöglichen, wurde die Bedeutung dieser zentralen Aspekte für die zukünftige Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen analysiert (Seiffert und Hesser 2014). Diese in den Projekten KLIWAS und BMVI-Expertenetzwerk für die Seeschifffahrtsstraßen eingesetzte Vorgehensweise erlaubt die kontinuierliche Berücksichtigung von neuen Erkenntnissen zur Bandbreite der Auswirkungen des Klimawandels in diesem Jahrhundert und darüber hinaus (Seiffert et al. 2014; Hänsel et al. 2020). Zudem können die Analyseergebnisse aus bereits vorhandenen Sensitivitätsstudien vor dem Hintergrund des jeweiligen Stands der Klimaforschung zeitlich neu eingeordnet werden.

Für die Sensitivitätsstudien wurden mit räumlich und zeitlich hochaufgelösten dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellen der Ästuarie von Elbe, Jade-Weser und Ems ausgewählte Zeiträume modelliert. Die Analyse der Modellergebnisse liefert charakteristische Größen wie die Tidekennwerte Tidehochwasser und Tideniedrigwasser. Ihr Vergleich ermöglichte es,

²⁷ Sturmebben werden als durch langanhaltenden starken ablandigen Wind und niedrigen Abfluss verursachte Tiden mit niedrigem Tideniedrigwasser und niedrigem Tidehochwasser definiert.

Veränderungen auf Grund der durch den Klimawandel veränderten Randbedingungen zu quantifizieren. Die Sensitivitätsstudien wurden sowohl für mittlere Verhältnisse als auch für Extremereignisse wie Sturmfluten oder Sturmebben durchgeführt.

Erwartete Entwicklungen für die Mitte und Ende des Jahrhunderts

Projektionen des IPCC-Sonderberichtes SROCC für das RCP8.5-Szenario ergeben eine wahrscheinliche Bandbreite für den globalen mittleren Meeresspiegelanstieg bis zur Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) von 0,23 bis 0,40 Meter und bis zum Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) von 0,61 bis 1,10 Meter (jeweils relativ zum Zeitraum 1986 bis 2005).

Für eine Bandbreite von erwarteten möglichen Meeresspiegelanstiegen zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts wurden unter anderem die Veränderungen im Tidehochwasser und Tideniedrigwasser entlang der Ästuar analysiert (BAW 2015a; BAW 2018). Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Wasserstands-Entwicklung in Cuxhaven (Elbemündung) und in Hamburg ohne Meeresspiegelanstieg sowie für eine Bandbreite von Meeresspiegelanstiegen zwischen 20 Zentimeter und 174 Zentimeter bei einem Abfluss von 500 Kubikmeter pro Sekunde (m^3/s) (BAW 2018).²⁸ Sowohl das Tidehochwasser als auch das Tideniedrigwasser werden um ungefähr den Betrag des Meeresspiegelanstieges angehoben.

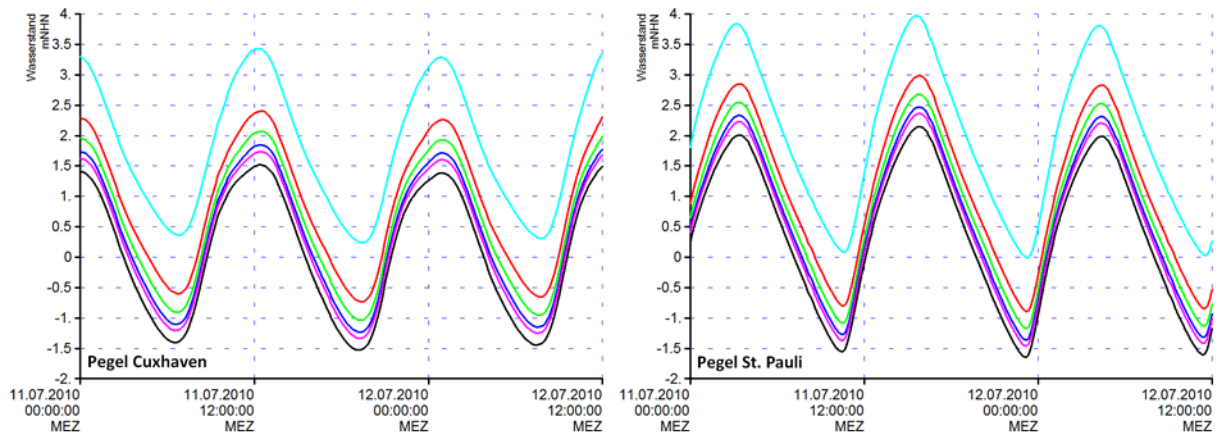
Die Analyse der Tidehochwasser und der Tideniedrigwasser entlang des Elbefahrwassers zeigt, dass Tidehochwasser und Tideniedrigwasser im gesamten Elbeästuar durch einen Meeresspiegelanstieg angehoben werden (Abbildung 12) (BAW 2018). Da die Tideniedrigwasser mit einem Meeresspiegelanstieg für die untersuchten Szenarien stets höher als die heutigen Tideniedrigwasser liegen, wird die Erreichbarkeit des Hamburger Hafens durch einen Meeresspiegelanstieg bei gleichbleibender Unterhaltungstiefe des Fahrwassers nicht verändert. Vergleichbare Ergebnisse erhält man für Weser und Ems (Seiffert et al. 2014; BAW 2015a; BAW 2015b). Ein durch einen Meeresspiegelanstieg erhöhtes Tideniedrigwasser und Tidehochwasser verändert die Durchfahrtshöhe von Brücken im Tidebereich und muss bei zukünftigen Planungen berücksichtigt werden.

Veränderungen im Sedimenttransport führen zu Veränderungen bei der Unterhaltung der Fahrwassertiefen. Hinweise zu Veränderungen im Sedimenttransport geben Analysen der Strömungsgeschwindigkeiten. Verursacht durch einen Meeresspiegelanstieg nimmt in vielen Bereichen der Ästuar die Flutstromgeschwindigkeit stärker zu als die Ebbestromgeschwindigkeit. Durch eine verstärkte Flutstromdominanz erhöht sich der stromaufgerichtete Sedimenttransport. Für die Unterhaltung der Ästuar als Seeschiffahrtsstraßen kann ein Meeresspiegelanstieg somit einen erhöhten Aufwand für die Unterhaltungsbaggerung aufgrund des verstärkten stromaufgerichteten Sedimenttransports bedeuten (Seiffert et al. 2014).

²⁸ Ein Anstieg des Meeresspiegels von 174 Zentimetern zum Ende des Jahrhunderts befindet sich nicht mehr in der wahrscheinlichen Bandbreite der Projektionen des SROCC und kann daher als Auswirkung eines sehr starken Klimawandels („High-end“-Szenario) verstanden werden.

Abbildung 11: Zeitreihen des Wasserstandes bei Cuxhaven (Elbe-Kilometer 725, links) und Hamburg St. Pauli (Elbe-Kilometer 625, rechts)

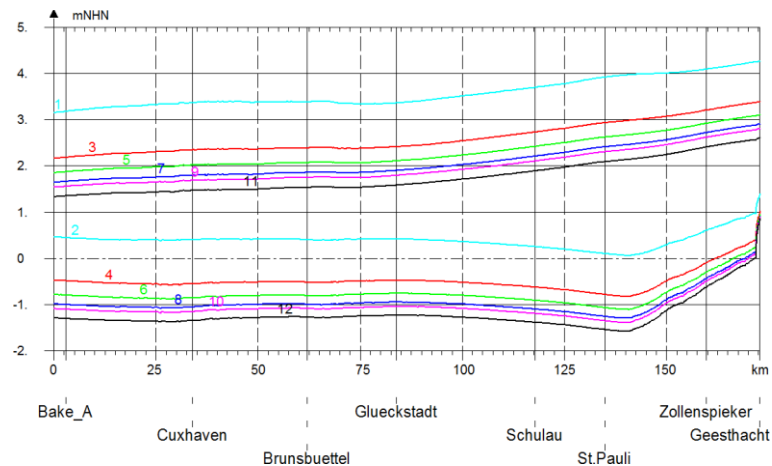
Beispielhafter Zeitraum von 36 Stunden ohne Meeresspiegelanstieg (schwarz), sowie mit Meeresspiegelanstiegsszenarien von 20 cm (magenta), 30 cm (blau), 50 cm (grün), 80 cm (rot) und 174 cm (cyan) (Abfluss: $500 \text{ m}^3/\text{s}$)



Quelle: BAW 2018, modifiziert.

Abbildung 12: Mittleres Tidehochwasser (MThw; markiert durch 1, 3, 5, 7, 9 und 11) und mittleres Tideniedrigwasser (MTnw, markiert durch 2, 4, 6, 8, 10 und 12) entlang des Elbefahrwassers von Bake A in der Elbmündung bis Geesthacht

Ohne Meeresspiegelanstieg (schwarz), sowie mit Meeresspiegelanstiegsszenarien von 20 cm (magenta), 30 cm (blau), 50 cm (grün), 80 cm (rot) und 174 cm (cyan) (Abfluss: $500 \text{ m}^3/\text{s}$)



Quelle: BAW 2018, modifiziert.

Vergleichbare Untersuchungen zur Bedeutung des Meeresspiegelanstieges sowie Abflussveränderungen für die Wasserstände bei Sturmflut sind in Rudolph (2014) dargestellt. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsstudie geben Hinweise auf Bandbreiten der durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen in den Sturmflutscheitelwasserständen, den Eintrittszeiten der Sturmflutscheitelwasserstände oder der Dauer hoher Wasserstände (BAW 2015b). Ein Meeresspiegelanstieg führt zu höheren Sturmflutscheitelwasserständen entlang des gesamten Ästuars, einer früheren Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes sowie einer längeren Dauer hoher Wasserstände.

her Wasserstände (Seiffert et al. 2014). Diese Veränderungen müssen sowohl bei der zukünftigen Nutzung der Häfen und ihrer Infrastruktur als auch bei der Planung des Küstenschutzes (siehe Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) berücksichtigt werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 49: „Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen“: 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 „Schiffbarkeit der Seeschifffahrtsstraßen“

- ▶ Durch einen Meeresspiegelanstieg werden sowohl die Tidehochwasser als auch die Tideniedrigwasser angehoben und somit wird bei gleichbleibender Unterhaltungstiefe des Fahrwassers die Erreichbarkeit der Häfen nicht verändert.
- ▶ Ein Meeresspiegelanstieg kann zu einer verstärkten Flutstromdominanz und dadurch erhöhtem stromaufgerichtetem Sedimenttransport führen. Für die Unterhaltung der Ästuare als Seeschifffahrtsstraßen kann ein Meeresspiegelanstieg somit einen erhöhten Aufwand für die Unterhaltungsbaggerungen bedeuten.
- ▶ Ein Meeresspiegelanstieg führt zu höheren Sturmflutscheitelwasserständen entlang des gesamten Ästuars. Die Sturmflutscheitelwasserstände treten früher ein und hohe Wasserstände dauern länger an.

4.2.4 Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel wirkt sich über Veränderungen des Wasserhaushaltes und veränderter atmosphärischer Zirkulationsmuster (Binnen- und Küstenbereich) auf die Intensität, Häufigkeit und Dauer von Hochwasserereignissen – Flusshochwasser, Sturmfluten und Überschwemmungen infolge von Starkregenereignissen – aus.²⁹ Werden gewisse Schwellenwerte überschritten, können auch die landgebundenen Verkehre auf Straße und Schiene durch Hochwasser beeinträchtigt werden.

Die Auswirkungen von Hochwasserereignissen lassen sich in direkte und indirekte Schäden unterteilen (Thieken 2015). Mit Bezug auf die Verkehrsinfrastruktur fallen beispielsweise unterspülte Straßen- und Bahndämme unter direkte Schäden, während die damit verbundenen weitreichenden Folgen der Verkehrsunterbrechungen indirekte Schäden darstellen. Insbesondere die indirekten Schäden sind schwer zu bewerten, sodass es nahezu unmöglich ist, vollständige Wirkungsketten und Schadensbilanzen für Hochwasserereignisse vorzulegen.

Die besondere Bedeutung von Hochwasserereignissen erschließt sich jedoch schon anhand der direkten Schäden. Für die Hochwasserereignisse 2002 und 2013 wurden im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Untersuchungen zur Bewältigung des Hochwassers 2013“ verschiedene Quellen zusammengetragen (Thieken 2015). Demnach lassen sich die direkten Schäden an der Infrastruktur des Bundes, die unter anderem Schäden an den Eisenbahnen, sowie Fern- und Bundeswasserstraßen beinhalten, mit rund einer Milliarden Euro (2002) beziehungsweise 0,3 Milliarden Euro (2013) beziffern (Thieken 2015).

Der Schienenverkehr war von diesen Ereignissen besonders betroffen. Gravierend war beispielsweise eine knapp fünfmonatige Unterbrechung der hochfrequentierten Schnellfahrstrecke zwischen Berlin und Hannover infolge eines Deichbruchs während des Hochwassers 2013. Die aus den notwenigen Umleitungen (circa 10.000 Personenzüge) resultierenden Verspätungen (30 bis 60 Minuten) veranlasste rund ein Drittel der Reisenden auf alternative Verkehrsträger umzusteigen (Thieken 2015). Auch der Straßenverkehr war großflächig beeinträchtigt. Eine Auswertung von polizeilichen Verkehrsmeldungen während und nach dem Hochwasser 2013 ergab, dass hier viele Verkehrsbehinderungen binnen weniger Tage nach dem Rückgang des Hochwassers beseitigt waren. Nur in Einzelfällen waren auch hier Verkehrseinschränkungen von mehrwöchiger Dauer zu verzeichnen (Thieken 2015).

Die Literatur liefert zahlreiche Hinweise auf eine zukünftige klimawandelbedingte Zunahme von Hochwasserereignissen infolge von Veränderungen des Wasserhaushaltes (Feyen et al. 2012; Alfieri et al. 2015; Blöschl et al. 2019) und des Meeresspiegels (BfG et al. 2015; Grinsted et al. 2015; Vousdoukas et al. 2017; Oppenheimer et al. 2019). Ein direkter Rückschluss bezüglich möglicher Auswirkungen extremer Hochwasserereignisse auf Straßen- und Schienenwege ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Neben den im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen besonderen Unsicherheiten von Daten, Modellen und Statistik im Bereich von Extremereignissen muss hier auch der Einfluss des im kontinuierlichen Ausbau befindlichen Hochwasserschutzes berücksichtigt werden.

Grundlage der Operationalisierung

Eine bundesweite Analyse von Verkehrseinschränkungen auf Schiene und Straße durch Hochwasser ist derzeit noch mit den Problemen konfrontiert, dass flächendeckende Daten zur Hö-

²⁹ Im Folgenden werden spezifisch Schäden/Hindernisse an Straßen und Schienenwegen aufgrund von Flusshochwasser betrachtet.

henlage der Gleiskörper beziehungsweise Fahrbahnen sowie flächendeckende und repräsentative Daten zu Wasserspiegellagen, die sich bei extremen Hochwasserereignissen unter Klimawandeleinfluss ergeben, fehlen. Ferner gelten hier alle in der Klimawirkung „Hochwasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ getroffenen Aussagen zu den Schwierigkeiten bei der Ableitung extremer Hochwasserabflüsse aus Klima- beziehungsweise Abflussprojektionen. Es kann keine generelle Information dazu gegeben werden, ab welchem Abfluss welcher Straßen- und Schienenabschnitt in Deutschland überflutet beziehungsweise für den Verkehr gesperrt ist und wie oft eine Sperrung in Zukunft zu erwarten ist. Entsprechende Forschungsarbeiten laufen noch.

Um dennoch allgemeine Richtungsaussagen zu Verkehrsbeeinträchtigungen zu ermöglichen, wird stellvertretend der Indikator "Tage über HQ10" gebildet (*Indikatoren-ID: VE-KL-03³⁰*). Dieser Abfluss, der statistisch alle zehn Jahre erreicht wird, ist in mehreren Bundesländern mit der Hochwassermeldestufe 2 verknüpft, bei der "leichte Verkehrsbehinderungen" einsetzen (LUBW 2018).³¹ Die verkehrliche Wirkung einer Schwellenwertüberschreitung ist somit vorhanden, aber begrenzt. Die zu erwartenden wirtschaftlichen Auswirkungen sind gering.

Ausgangspunkt für die Ermittlung von Änderungen unter Klimawandeleinfluss sind jeweils die 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“).

Der Schwellenwert des zehnjährigen Abflusses (HQ10) wird anhand der simulierten Daten des Zeitraumes 1971 bis 2000 ermittelt (HQ10₁₉₇₁₋₂₀₀₀). Änderungen in den Zukunftsperioden (2031 bis 2060 beziehungsweise 2071 bis 2100) werden nur in Richtung Zunahme gezeigt, da nur in diesen Fällen von einer höheren Betroffenheit des Verkehrs auszugehen ist. Die Auswertung bezieht sich ausschließlich auf den Wirkungspfad "Flusshochwasser" und beschränkt sich auf Rasterzellen, deren Einzugsgebiete größer als 1.000 Quadratkilometer sind. Wirkungspfade, die durch lokale Ereignisse wie Starkregen, Sturzfluten oder durch Sturmfluten in Gang gesetzt werden, sind nicht berücksichtigt. Ferner sind die nur zu einem sehr geringen Anteil auf deutschem Gebiet liegenden Einzugsgebiete der Maas, welche überwiegend in Frankreich, Belgien und den Niederlanden liegen und der Oder, welche überwiegend in Polen liegt, nicht abgedeckt.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Für den Bezugszeitraum wird bei allen betrachteten Fließgewässern der Schwellenwert definitivonsgemäß im Mittel an weniger als einem Tag pro Jahr überschritten (Abbildung 13).

³⁰ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

³¹ vgl. LUBW 2018:

- Meldestufe 2, Bayern: „Land- und forstwirtschaftliche Flächen überflutet oder leichte Verkehrsbehinderungen auf Hauptverkehrs- und Gemeindestraßen.“
- Meldestufe II, Hessen: „Flächenhafte Überflutung ufernaher Grundstücke, leichte Verkehrsbehinderungen auf Gemeinde- und Hauptverkehrsstraßen, Gefährdung einzelner Gebäude, Überflutung von Kellern.“
- Informationswert 2, Nordrhein-Westfalen: „Gefahr der Überflutung einzelner bebauter Grundstücke oder Keller; Sperrung überörtlicher Verkehrsverbindungen oder vereinzelter Einsatz der Wasser- oder Dammwehr (Feuerwehr, Katastrophenschutz) möglich.“
- Meldestufe 2, Saarland: „Landwirtschaftliche Flächen, evtl. auch einzelne Gebäude überflutet, örtlich leichte Verkehrsbehinderungen.“
- Alarmstufe 2, Sachsen: „Überschwemmung land- und forstwirtschaftlicher Flächen und einzelstehender Gebäude oder leichte Verkehrsbehinderung; bei eingedeichten Gewässern Ausuferung bis an den Deichfuß.“
- Alarmstufe 2, Sachsen-Anhalt: „Ausuferungen beginnen, die bei eingedeichten Gewässern bis an den Deichfuß reichen. Land- und forstwirtschaftliche Flächen sind überflutet, teilweise leichte Verkehrsbehinderungen an Straßen.“

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für die Mitte des Jahrhunderts kann im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) für die betrachteten Fließgewässer keine nennenswerte Änderung festgestellt werden (Abbildung 13).

Auch bei Betrachtung des pessimistischen Falls (85. Perzentil des RCP8.5) ergeben sich großflächig keine oder nur geringen Zunahmen. Eine Ausnahme stellt die Elbe und ihre Nebengewässer dar. Hier werden Zunahmen auf regional bis vier Tage über dem gewählten, mit leichten Verkehrseinschränkungen verbundenen Schwellenwert projiziert.

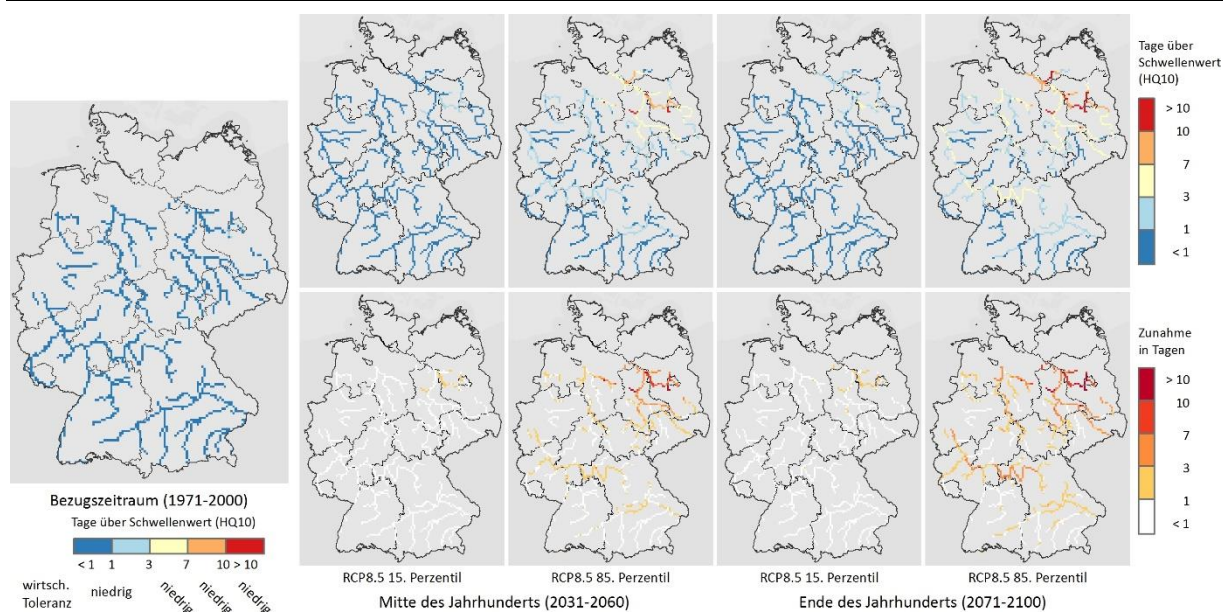
Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Die Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts zeigen im optimistischen Fall weitgehend unveränderte Bedingungen gegenüber dem Bezugszeitraum (Abbildung 13). Einzig die Elbe und ihre Nebengewässer zeigen eine moderate Zunahme auf ein bis drei Tage über dem Schwellenwert.

Im pessimistischen Fall ergeben sich großflächig Zunahmen, die in weiten Teilen Deutschlands mit ein bis drei Tagen moderat sind und erneut im Osten Deutschlands mit circa fünf Tagen regional etwas stärker ausfallen.

Der gewählte Indikator zeigt unter Annahme einer pessimistischen Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen (RCP8.5) und einer starken Reaktion des Systems Klima-Wasserhaushalt (85. Perzentil des Ensembles) vor allem in Ostdeutschland Zunahmen in Bezug auf potenzielle hochwasserbedingte Verkehrseinschränkungen. Der gewählte Schwellenwert ist jedoch nur mit leichten Verkehrsbehinderungen der Straßen- und Schienenwege verbunden. Aufgrund der genannten Daten- und Modelleinschränkungen sind Aussagen zu Sperrzeiten, Infrastrukturschäden und damit zur Dauer von verkehrswirtschaftlich relevanten Verkehrseinschränkungen spezifischer Straßen- und Schienenabschnitte nicht möglich.

Abbildung 13: Tage über dem Schwellenwert HQ10 für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts (jeweils 15. und 85. Perzentil des RCP8.5) und Änderungswerte für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

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 jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 50: „Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Kernaussagen zu „Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)“

- Eine streckenspezifische Modellierung von hochwasserbedingten Sperrungen und Schäden der Straßen und Schienenwege ist derzeit nicht möglich, weswegen direkte Schlüsse auf die verkehrlichen Auswirkungen von Hochwasserereignissen nicht gezogen werden können. Hier wird der zehnjährige Hochwasserabfluss als stellvertretender Indikator verwendet.
- Für die Mitte des Jahrhunderts ergeben sich für den optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) keine wesentlichen Änderungen gegenüber dem Bezugszeitraum. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) verweist der verwendete Indikator auf häufigere Einschränkungen (drei bis zehn Tage) von Schienen- und Straßenverkehren in Ostdeutschland.
- Für das Ende des Jahrhunderts ergeben sich zumeist keine weiteren Änderungen gegenüber der Mitte des Jahrhunderts. Auch hier wird eine nennenswerte Zunahme der Tage mit potenziellen Beeinträchtigungen des Landverkehrs vor allem an der Elbe und ihren Nebengewässern projiziert. An der Havel und der Elbe unterhalb der Havelmündung können zehn Tage überschritten werden.

4.2.5 Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Gravitative Massenbewegungen)

Hintergrund und Stand der Forschung

Als gravitative Massenbewegungen werden „hangabwärts gerichtete Bewegungen von Fest- und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft“ bezeichnet (Glade und Dikau 2001). Eine Unterscheidung findet dabei zwischen Rutschungen, Gleit-, Sturz- und Fließprozessen statt (Lohrengel et al. 2020).

Sowohl der Straßen- wie auch der Schienenverkehr können durch gravitative Massenbewegungen auf verschiedene Weisen beeinträchtigt werden (Lohrengel et al. 2020). Hindernisse auf Straßen- und Schienenwegen können die Ursache von Unfällen sein, welche wiederum zu Beeinträchtigungen im Verkehrsablauf führen. Auch die Verkehrsinfrastruktur kann beschädigt werden. Die daraus entstehende Instandsetzung kann dann für weitere Behinderungen und Verzögerungen sorgen (Lohrengel et al. 2020).

In einer Studie von Keller und Atzl (2014) wurden im Zeitraum vom 28. Mai bis 03. Juni 2013 insgesamt 117 Fälle von Straßenbeeinträchtigungen gezählt, die im Zusammenhang mit der Jahrhundertflut standen. Die meisten dieser Verkehrseinschränkungen äußerten sich in Straßensperrungen. Ein Viertel aller Vorfälle wurden hier durch gravitative Massenbewegungen verursacht (Keller und Atzl 2014). Neben Verkehrseinschränkungen hat vor allem die Instandhaltung und Instandsetzung finanzielle Auswirkungen. In Niedersachsen wurden im Zeitraum 1980 bis 2010 durchschnittlich rund drei Millionen Euro pro Jahr an Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten durch gravitative Massenbewegungen aufgewandt (Klose et al. 2015).

In Deutschland weisen besonders Gebiete mit steilen Schichtstufenhängen, die alpinen Regionen, tiefe Taleinschnitte in den Mittelgebirgen, wie zum Beispiel des Mittelrheins, der Mosel und im Harz, eine hohe Gefährdung für gravitative Massenbewegungen auf (Dikau und Glade 2003). Auch Steilküsten an Nord- und Ostsee sowie Talauen mit unbefestigten Uferböschungen sind potenziell gefährdet. Betroffene Bereiche sind meist schon vor der gravitativen Massenbewegung durch Tektonik, Erosion oder Verwitterung vorbelastet (Krauter et al. 2012; Genske 2017). Die Hangstabilität wird zudem von der Zusammensetzung und Beschaffenheit des Untergrundes und der Hangneigung beeinflusst (Lohrengel et al. 2020). Auch die Hangrichtung, die Höhenlage und die Vegetation bestimmen die Anfälligkeit für Massenbewegungen (Krauter et al. 2012).

Auslösende Faktoren für gravitative Massenbewegungen sind extreme Wetterereignisse wie Dauerniederschlag, Starkniederschlag oder Frost-Tau-Wechsel sowie unterschiedliche Witterungen (Lohrengel et al. 2020). Insbesondere in Bezug auf Verwitterungsprozesse können neben Niederschlägen und Frost-Tau-Wechseln auch Luftfeuchte, Wind und Sonneneinstrahlung gravitative Massenbewegungen begünstigen (Krauter et al. 2012). Geht man von einer durch den Klimawandel bedingten Zunahme an Tagen mit Starkniederschlägen aus, kann dies Verwitterungs- und Erosionsprozesse begünstigen. Dies trägt wiederum zu einer Destabilisierung von Gesteinsverbänden bei (Krauter et al. 2012).

Im Rahmen des Forschungsvorhabens des BMVI-Expertennetzwerks wurde für das deutsche Bundesstraßen- und Schienennetz eine Klimawirkungsanalyse für Hangrutschungen durchgeführt und untersucht, wie sich klimatische Parameter durch den Klimawandel verändern und zukünftig auf die Hangstabilität auswirken können (Lohrengel et al. 2020).

Grundlage der Operationalisierung

Mit Bezug auf gravitative Massenbewegungen wurde eine Expositionsanalyse für das Bundesstraßen- und Schienennetz in zwei Teilschritten durchgeführt. Für das Bundesfernstraßen- und das Bundesschienennetz wurden durch externe Forschungsprojekte Hinweiskarten erstellt

(EBA 2019; Schipek und Kallmeier 2019). Diese beinhalten die Ermittlung der ingenieurgeologischen Grunddisposition für allgemeine gravitative Massenbewegungen. Hierunter wurden zunächst alle Typen von gravitativen Massenbewegungen gefasst, ohne eine Prozessdifferenzierung nach Rutschungen, Gleit-, Sturz- und Fließprozessen vorzunehmen. Im Anschluss wurde eine Methode zur Integration von Klimaprojektionsdaten entwickelt. Dabei wurden die Ergebnisse des ingenieurgeologischen Ansatzes entsprechend der klimatischen Gegebenheiten des Bezugszeitraums sowie der projizierten Zukünfte modifiziert (Lohrengel et al. 2020).

Die ingenieurgeologische Hinweiskarte wurde in einem Geographischen Informationssystem (GIS) entwickelt, das neben dem Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetz die Informationsschichten zu verschiedenen Geländeeigenschaften wie Hangneigung, Fließrichtung, Fließakkumulation und Oberflächenwölbung sowie geologische Parameter wie Gesteinsklasse, Verformungsempfindlichkeit, Korngrößenverteilung, Klüftung und Trennflächengefüge sowie Informationen zur Landnutzung (Versiegelungsgrad, Bewuchs) wiedergibt (Lohrengel et al. 2020). Zudem wurde ein Ereignisdatenkataster bezüglich gravitativer Massenbewegungen einbezogen, das auf Grundlage von Daten der geologischen Dienste der Bundesländer erstellt wurde. Dieses beinhaltet insgesamt 11.658 Ereignisse. Auf dieser Datengrundlage wurden durch Verknüpfung der Gesteinsklasse (Fest- und Lockergestein, gemischtkörnig, rollig und bindig) mit der Hangneigung zunächst fünf Hauptgefährdungs- und insgesamt 15 Gefährdungsklassen abgeleitet (Lohrengel et al. 2020)(Tabelle 51). Die Klassifizierung erfolgte auf Basis von Expertenwissen.

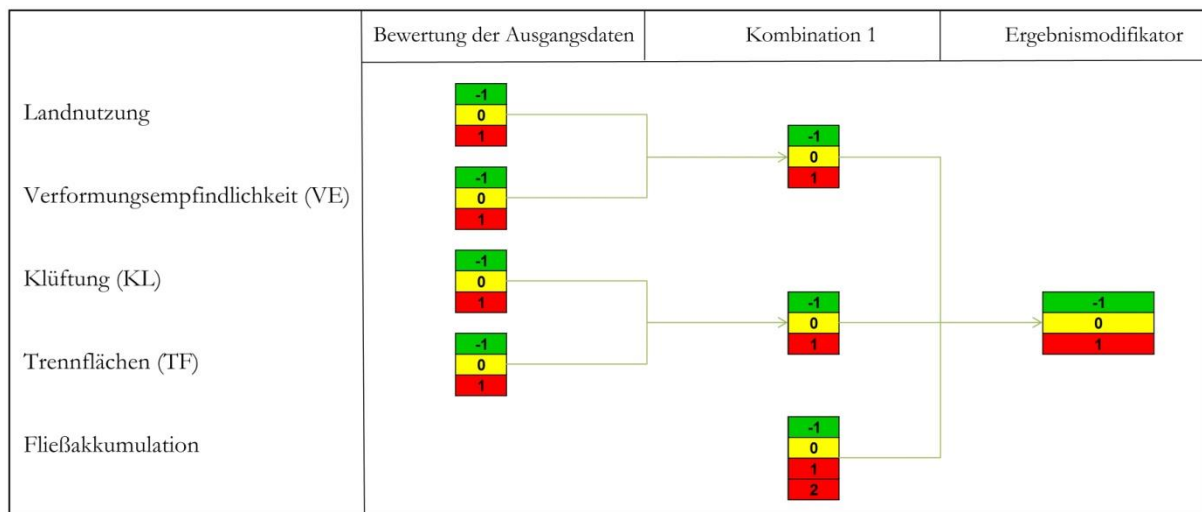
Tabelle 51: Expertenwissensbasierte Klassifikation des Gefährdungspotenzials durch Verschnitt der Gesteins- und der Hangneigungs-klassen.

Bezeichnung	Hauptgefährdungsklasse	Gefährdungs- klasse (untergliedert)	Lockergestein			Festgestein
			GÜK200 Gesteinsklassifikation			
			gemischt-körnig	rollig	bindig	
zugeordnete Hangneigung						
sehr stark gefährdet	5	15	> 36°		> 30°	> 60°
		14				
		13				
stark gefährdet	4	12	> 30 - 36°	> 36°	> 25 - 30°	> 50 - 60°
		11				
		10				
mäßig gefährdet	3	9	> 25 - 30°	> 30 - 36°	> 10 - 25°	> 30 - 50°
		8				
		7				
gering gefährdet	2	6	> 10 - 25°	> 25 - 30°	0 - 10°	0 - 30°
		5				
		4				
nicht bis sehr gering gefährdet	1	3	0 - 10°	0 - 25°		
		2				
		1				

Quelle: Lohrengel et al. 2020; S. 21

Zur anschließenden Spezifizierung der fünf Hauptgefährdungsklassen wurden die Parameter der Landnutzung sowie zusätzliche Substrat- und Reliefeigenschaften herangezogen (Lohrengel et al. 2020)(Abbildung 14).

Abbildung 14: Fließschema zur Berechnung der Modifikation (Spezifizierung) der Hauptgefährdungsklassen für allgemeine gravitative Massenbewegungen

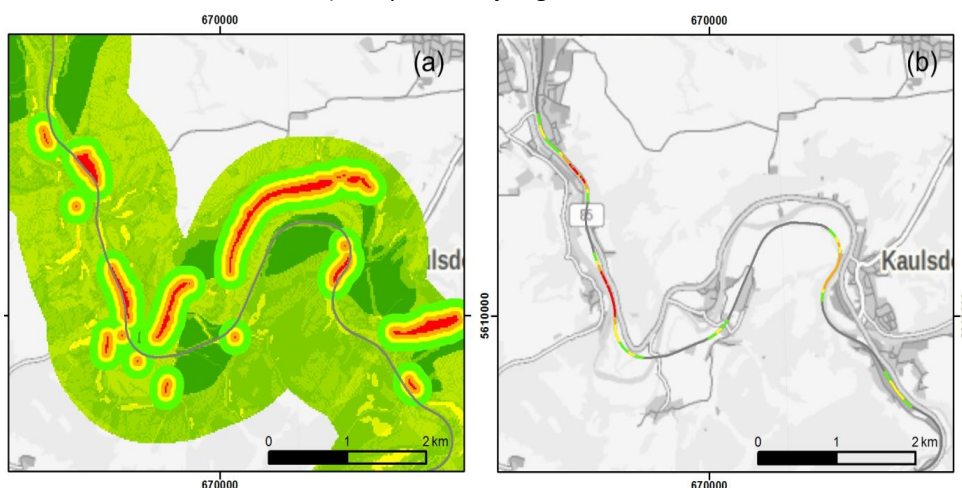


Quelle: Lohrengel et al. 2020; S. 22

Anschließend wurde für die Bereiche einer potenziellen Gefährdung ein räumlicher Bezug zum Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetz geschaffen (Lohrengel et al. 2020). Dabei wurden Pufferbereiche in einem Umkreis von 50, 100 und 200 Metern gebildet, um einen Überblick über die Streckenabschnitte zu erstellen, die in potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bereichen liegen (Gefährdungsklasse ≥ 10) (Abbildung 15a). Anschließend wurde das Straßen- beziehungsweise Schienennetz mit diesen Zonen verschnitten, um die potenziell gefährdeten Streckenabschnitte zu identifizieren (Abbildung 15b).

Abbildung 15: Pufferbereiche um die potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bereiche (Gefährdungsklassen ≥ 10) (a) sowie die gefährdeten Streckenabschnitte des Bundesschienennetzes (b)

Die Farbgebung der mittels des Expertenwissen-basierten Ansatzes identifizierten Gefährdungsklassen (mit Ausnahme der Pufferbereiche) entspricht derjenigen in Tabelle 51.



Quelle: Lohrengel et al. 2020; S. 22, modifiziert

Zur Berücksichtigung des klimatischen Einflusses auf gravitative Massenbewegungen wurden Klimaparameter wie mittlerer Jahresniederschlag, mittlerer Sommerniederschlag, mittlerer Winterniederschlag, Anzahl der Starkregentage und Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel aus

Klimaprojektionsdaten abgeleitet und Änderungssignale für das RCP8.5-Szenario für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts gegenüber dem Bezugszeitraum berechnet (Tabelle 52). Die erhaltenen Änderungssignale bilden die Basis für die weitere Modifikation der Klassifizierungsergebnisse des ingenieurgeologischen Ansatzes. Dabei wurde beispielsweise davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Anzahl an Tagen mit Starkregen oder mit Frost-Tau-Wechseln verstärkend auf die Hangrutschungsdisposition wirken. Die ingenieurgeologischen Rahmenbedingungen bleiben jedoch der dominierende Faktor für die Exposition von Bundesfernstraßen- und Bundesschienenstrecken gegenüber gravitativen Massenbewegungen.

Tabelle 52: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Potenziell durch gravitative Massenbewegungen gefährdete Bundesfernstraßen- und schienenabschnitte	Gesamtlängen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bundesfernstraßen- und -schienenabschnitte (Gefährdungsklasse ≥ 10) Klimaparameter: - Mittlerer Jahresniederschlag - Mittlerer Winterniederschlag (Dezember, Januar, Februar) - Mittlerer Sommerniederschlag (Juni, Juli, August) - Anzahl an Tagen mit Niederschlag ≥ 20mm - Anzahl der Tage mit Frost-Tau-Wechsel	VE-KL-04

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

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den klimatischen Bedingungen des Bezugszeitraums rund fünf Prozent beziehungsweise sechs Prozent des Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetzes grundsätzlich gegenüber gravitativen Massenbewegungen exponiert sind (Tabelle 53).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Unter Annahme des RCP8.5-Szenarios werden für die Zukunft weitere Strecken als potenziell gefährdet klassifiziert. Für die Mitte des Jahrhunderts erhöht sich der Anteil des potenziell gefährdeten Bundesfernstraßen- und Bundesschienennetzes laut Modell um jeweils etwa einen Prozentpunkt, das heißt um 390 Kilometer beziehungsweise 370 Kilometer (Tabelle 53).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Für das Ende des Jahrhunderts erhöht sich der Anteil potenziell gefährdeter Straßenstrecken um weitere zwei Prozentpunkte (+1.060 Kilometer) und jener der Schienenstrecken um circa drei Prozentpunkte (+900 Kilometer) im Vergleich zum heutigen Streckennetz (Tabelle 53).

Tabelle 53: Gesamtlängen der potenziell stark bis sehr stark gefährdeten Bundesfernstraßen- und -schienenabschnitte (Gefährdungsklasse ≥ 10) im Bezugszeitraum (1971 bis 2000) und unter Berücksichtigung potenzieller Klimaänderungen (RCP8.5) für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts

Verkehrsträger	Straße		Schiene	
Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen Bezugszeitraum				
Gesamtlänge	51.150 km		34.140 km	
Gefährdete Streckenabschnitte (ingenieurgeolog. Disposition)	1.640 km	3 %	1.340 km	4 %
Gefährdete Streckenabschnitte (mit Klimamodifikator)	2.590 km	5%	1.900 km	6 %
Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen Mitte und Ende des Jahrhunderts				
	2031–2060		2071–2100	
	[km]	[%]	[km]	[%]
Gefährdete Streckenabschnitte (mit Klimamodifikator nach dem RCP8.5-Szenario)	2.980	6	3.650	7
Zunahme	390	1	1.060	2

Quelle: Lohrengel et al. 2020, modifiziert

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 54: „Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Gravitative Massenbewegungen)“: Klimarisiko ohne Anpassung

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

Kernaussagen zu „Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Gravitative Massenbewegungen)“

- ▶ Es ist davon auszugehen, dass gravitative Massenbewegungen hauptsächlich durch ingenieur-geologische Einflussgrößen geprägt sind. Klimatische Parameter können jedoch zusätzlich modifizierend und gegebenenfalls auslösend wirken.
- ▶ Im Bezugszeitraum sind unter Berücksichtigung klimatischer Einflüsse rund 2.590 Kilometer (circa fünf Prozent) des Bundesfernstraßen- und 1.900 Kilometer (circa sechs Prozent) des Bundesschienennetzes gegenüber gravitativen Massenbewegungen exponiert.
- ▶ Für das RCP8.5-Szenario wird eine Zunahme des Anteils der als potenziell betroffenen Strecken gegenüber gravitativen Massenbewegungen projiziert. Für die Mitte des Jahrhunderts können weitere 390 Kilometer des Bundesfernstraßennetzes beziehungsweise zusätzliche 370 Kilometer des Bundesschienennetzes potenziell exponiert sein (jeweils circa ein Prozentpunkt mehr). Für das Ende des Jahrhunderts beträgt die Zunahme gegenüber dem Bezugszeitraum 1.060 Kilometer für die Straße beziehungsweise 900 Kilometer für die Schiene (zwei beziehungsweise drei Prozentpunkte).

4.2.6 Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen

Hintergrund und Stand der Forschung

Verkehrsleitsysteme, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen haben eine hohe Relevanz für die Funktionalität deutscher Verkehrssysteme. Schon einzelne Ausfälle können zu Kaskadeneffekten führen, die Teilbereiche des gesellschaftlichen Lebens beeinträchtigen (BMI 2009). Zu den Verkehrsleitsystemen gehören unter anderem Ampeln, Schilder und Wechselverkehrszeichen im Straßen- und Binnenschiffsverkehr oder auf Flughäfen. Oberleitungen werden fast ausschließlich im Schienenverkehr eingesetzt und dienen der Versorgung elektrischer Eisenbahnen (Hunger 2007). Strommasten und andere Infrastrukturelemente der Stromerzeugung und des Stromtransports werden als Stromversorgungsanlagen bezeichnet.

Verkehrsleitsysteme, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen werden insbesondere durch klimatische Einflüsse wie Hitzeperioden, Trockenheit, Stürme und Gewitter sowie Kälteperioden mit starkem Schneefall beeinträchtigt (Mahammadzadeh und Biebeler 2009; Bardt et al. 2012; Vogt et al. 2016). Während Hitzeperioden können Materialschäden an Verkehrsleitsystemen und Stromversorgungsanlagen entstehen (Hoffmann et al. 2009). Weiterhin kann langanhaltende Trockenheit zu Schäden an Vegetation führen, welche daraufhin anfälliger für Windbrüche wird. Stürme und dadurch ausgelöste Windbrüche von Bäumen können direkte Schäden an freistehenden Strukturen wie Masten, Oberleitungen und Verkehrsleitsysteme verursachen (Hoffmann et al. 2009; Rotter et al. 2011a; Bardt et al. 2013; BABS 2015). Wetterbedingte Beschädigungen der Oberleitungen führen zum zeitweiligen Ausfall des Schienenverkehrs und somit zu Einschränkungen im Personen- und Gütertransport (Mahammadzadeh und Biebeler 2009; Hoffmann et al. 2011; GDV 2018). Ausfälle entstehen auch, wenn Oberleitungen während Kälteperioden einfrieren (Hoffmann et al. 2011; BABS 2015). Zu hohe Schnee- und Eislasten beschweren Masten, Verkehrsleitsysteme und Oberleitungen. Dies kann Schäden an Leitungen und Masten verursachen. Schneelasten schränken zudem die Sichtbarkeit von Verkehrsleitsystemen ein. Blitzeinschläge können Unterbrechungen in der Stromversorgung auslösen und Signale beschädigen (Hoffmann et al. 2009; Rotter et al. 2011a).

Der Verkehrssektor weist eine hohe Wetterabhängigkeit auf, da Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen Transporte behindern, stark verzögern oder sogar zeitweilig verhindern können (Vogt et al. 2016). Schon der Ausfall von Ampeln kann zu maßgeblichen Störungen führen (Lorenz 2010). Die genannten Schäden erhöhen zudem den Instandhaltungsaufwand und die dafür vorgesehenen Ausgaben (Hoffmann et al. 2011). Langfristige Beeinträchtigungen von Verkehrsleitsystemen und Stromversorgungsanlagen können weitere soziale und volkswirtschaftliche Folgen haben (BMI 2009; Deutscher Bundestag 2013). Viele freistehende Verkehrsleitsysteme, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen sind bereits durch vermehrte Schäden, ausgelöst durch extreme Wetterereignisse, reparaturbedürftig (Fichter und Stecher 2011).

Die Sensitivität der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland hängt zusätzlich von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise der Infrastrukturdichte, dem Vorkommen hitzeanfälliger Vegetationsarten und den Standortbedingungen an Straßen- und Schienenabschnitten ab.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

In Zukunft kann die erwartete Zunahme an heißen Tagen zu erhöhten Risiken für Verkehrsleitsysteme, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen führen (Heymann 2008; Ott und Richter 2008; Rotter et al. 2011b). Für die zukünftige Entwicklung der Anzahl an heißen Tagen wird im pessimistischen Fall eine Zunahme auf bis zu 40 heiße Tage pro Jahr für die Mitte des Jahrhun-

derts und bis zu 70 Heiße Tagen pro Jahr für das Ende des Jahrhunderts erwartet (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“). Dies kann, neben einer Zunahme an hitzebedingten Materialschäden, zu einem Anstieg von Hitzeschäden an Vegetation führen, welche die Anfälligkeit von betroffenen Bäumen für Windbruch erhöhen würde. Neben Hitze ist dabei auch langanhaltende Trockenheit ein wichtiger Faktor für möglichen Windbruch. Projektionen zur Trockenheit basierend auf der maximalen Trockenperiode im hydrologischen Sommerhalbjahr und der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode weisen sowohl Zu- wie auch Abnahmen auf, so dass für die Belastung der Vegetation durch Trockenheit keine eindeutigen Trends ausgewiesen werden können (siehe 2.2.2).

Eine Zunahme von Windbrüchen nahe Oberleitungen kann zu erhöhten Schäden an der Schieneninfrastruktur führen. Potenzielle Windbrüche und Schäden durch Sturmereignisse sind daher auch von zukünftigen Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Stürmen abhängig. Projektionen zu Änderungen von Windfeldern und somit zur zukünftigen Entwicklung von Stürmen zeigen jedoch bisher noch keine eindeutigen Änderungstendenzen auf und unterliegen hohen Unsicherheiten (Pinto und Reyers 2017).

Das Risiko von Materialschäden und die Beeinträchtigung von Verkehrsleitsystemen durch Kälteperioden, Schnee- und Eislasten wird sich zukünftig vermutlich durch die abnehmende Zahl an Frosttagen verringern.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 55: „Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen“: 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 „Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen“

- ▶ Verkehrsleitsysteme, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen können in Zukunft durch den erwarteten Temperaturanstieg und die Zunahme an Heißen Tagen verstärkt durch die Auswirkungen von Hitze beschädigt werden.
- ▶ Durch die projizierte Abnahme der Zahl an Frosttagen werden sich dagegen Schäden durch Schnee- und Eislasten wahrscheinlich reduzieren.
- ▶ Da keine eindeutigen Änderungstendenzen für Windfelder vorliegen und die Projektionen hohen Unsicherheiten unterliegen, können keine gesicherten Aussagen für die zukünftige Beeinträchtigung von Oberleitungen durch Windbrüche getroffen werden.

4.2.7 Schäden an Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen

Hintergrund und Stand der Forschung

Der deutsche Schiffsverkehr ist ein wichtiger Knotenpunkt des nationalen und internationalen Warenverkehrs. Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen verbinden entfernte Handelspartner miteinander und transportieren Güter in hohen Mengen. Häfen sowie maritime Infrastrukturen haben eine große Bedeutung für Unternehmen und wickeln einen hohen Anteil deutscher Exporte ab (Bundesregierung 2016; Destatis 2019). Es wird erwartet, dass die Hafenumschläge deutscher Seehäfen bis 2030 um 74 Prozent des Gesamtumschlagsvolumens im Vergleich zu 2010 steigen (BMVI 2016a). Um die genannten Funktionen zu erfüllen, bedarf es leistungsstarker Infrastrukturen, Häfen, Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen.

Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritime Infrastrukturen sind verschiedenen klimatischen Einflüssen ausgesetzt. So können Schäden an Binnenschifffahrtsstraßen durch Hochwasserereignisse, Starkniederschläge und Stürme verursacht werden. Seeschifffahrtsstraßen sind Sturmfluten und den Folgen des Meeresspiegelanstiegs ausgesetzt (siehe 4.2.3) (Enei et al. 2010; HPA 2018; Peter et al. 2019).

Eine Überflutung von Hafeninfrastrukturen wie Kaianlagen oder Containerterminals, sowie der angrenzenden, teilweise in niedrigliegenden Gebieten befindlichen Transportinfrastruktur, kann aufgrund der gesamtwirtschaftlichen Bedeutung der Häfen auch weitreichende wirtschaftliche Auswirkungen für deutsche Unternehmen haben (Schröder und Hirschfeld 2014; Weiher 2018; Peter et al. 2019). Neben Betriebsausfällen sind auch direkte Schäden an den Transportgütern sowie die Korrosion von in den betroffenen Gebäuden und Hafenanlagen verbauten Materialien möglich (Deutscher Bundestag 2014; Weller et al. 2016; Weiher 2018). Stürme und Starkwinde können außerdem erhebliche Schäden an Binnen- und Seehäfen und maritimen Infrastrukturen verursachen (BMW i 2011; Deutscher Bundestag 2014). An Binnen- und Seehäfen kann dadurch die Be- und Entladung, der Betrieb von hochragenden Anlagen und die Lagerung von Leercontainern erschwert werden (Weiher 2018). See- und Binnenschifffahrtsstraßen können bei extremer Kälte einfrieren und technische Infrastrukturen können durch Vereisung beeinträchtigt oder durch wanderndes Eis beschädigt werden (Enei et al. 2010).

Viele Verkehrsinfrastrukturen in Deutschland haben sich bereits in der Vergangenheit als sanierungsbedürftig erwiesen und weisen zum Teil einen niedrigen Modernitätsgrad auf (BMVI 2014; BMVI 2016b; Bundesregierung 2016). Die Vulnerabilität von Häfen und maritimen Infrastrukturen der norddeutschen Küsten- und Flussmündungsgebiete gegenüber klimatischen Einflüssen ist besonders hoch (Rudolph 2014; Seiffert et al. 2014). Am Hamburger Hafen existieren heutzutage zeitweise Verkehrslimitierungen beim Auftreten von Starkwinden oder Vereisungen durch Kälteperioden (HPA 2018).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Projektionen des IPCC-Sonderberichtes SROCC für das RCP8.5-Szenario ergeben eine wahrscheinliche Bandbreite für den globalen mittleren Meeresspiegelanstieg bis zur Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) von 0,23 bis 0,40 Meter und bis zum Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) von 0,61 bis 1,10 Meter (jeweils relativ zum Zeitraum 1986 bis 2005) (siehe „Meeresspiegelhöhe“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) (Oppenheimer et al. 2019).

Für die Mitte des Jahrhunderts gelten die Küstenregionen als besonders gefährdet, da die Folgen des Meeresspiegelanstiegs und die Auswirkungen von Sturmfluten große Risikofaktoren für Schäden an Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen darstellen (Schröder und Hirschfeld 2014). Ein verstärkter stromaufwärts gerichteter Sedimenttransport kann die

Befahrbarkeit von Seeschifffahrtsstraßen beeinträchtigen (siehe 4.2.3) (Weiher 2018). Unternehmen der Hafeninfrastruktur sehen Risiken insbesondere in einer möglichen Zunahme von Überflutungen und in der zunehmenden Unfallgefahr (Karczmarzyk und Pfriem 2011). Überflutungen können sowohl zu kurzfristigen Betriebsstörungen führen als auch Schäden an der Statik maritimer Infrastrukturen nach sich ziehen und deren Funktionalität langfristig schädigen.

Jedoch verringert sich durch den erwarteten Anstieg der mittleren Lufttemperatur beispielsweise das Risiko von Vereisungen und dadurch entstehenden Schäden (Schröder und Hirschfeld 2014; BfG et al. 2015; Weiher 2018).

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs zum Ende des Jahrhunderts die Risiken für Schäden an Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen weiter erhöhen werden. Insbesondere bei der Höhe des zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs bestehen jedoch noch erhebliche Unsicherheiten, da die Beiträge der antarktischen Eisschmelze bisher nur schwer modellierbar sind und aktuelle Messungen für den westantarktischen Schelf darauf hindeuten, dass die antarktische Eisschmelze sich schneller als erwartet beschleunigt (Oppenheimer et al. 2019).

Die Zunahme extremer Wetterereignisse wie Starkniederschläge und Hochwasserereignisse gefährdet die Infrastruktur der Binnenschifffahrtsstraßen, welche anfälliger für klimabedingte Schäden wird (Gönnert et al. 2004; Hänsel et al. 2020). Dabei kann die erwartete Zunahme von Tagen mit einer Gesamtniederschlagsmenge von über 20 Millimetern zu erhöhten Risiken für Hochwasserereignisse und Überschwemmungen führen (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Ergebnisse des Forschungsvorhabens KLIWAS zeigen, dass bis 2050 lediglich geringe Herausforderungen für die Wasserstraßeninfrastruktur durch klimatische Einflüsse erwartet werden, diese jedoch zum Ende des Jahrhunderts zunehmen können (BMVBS 2013). Auch die Ergebnisse des BMVI-Expertennetzwerks verdeutlichen die klimawandelbedingten Herausforderungen für das Verkehrsinfrastrukturmanagement, insbesondere zum Ende des Jahrhunderts (Hänsel et al. 2020).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 56: „Schäden an Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen“: 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 „Schäden an Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen“

- ▶ Seeschifffahrtsstraßen, Häfen und maritime Infrastrukturen werden in Zukunft verstärkt den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs ausgesetzt sein.
- ▶ Für Binnenschifffahrtsstraßen können durch die erwartete Zunahme von Starkniederschlägen erhöhte Risiken für Schäden durch Hochwasserereignisse und Überschwemmungen entstehen.
- ▶ Die Auswirkungen stellen nach Projektionen des Forschungsprogramms KLIWAS bis 2050 eine geringe Herausforderung für die Funktionalität der Wasserstraßen- und Hafeninfrastruktur dar. Es wird vermutet, dass das Risiko für Schäden durch die Folgen des Klimawandels bis zum Ende des Jahrhunderts weiter zunehmen wird. Dies bestätigen auch die Ergebnisse des BVMI-Expertennetzwerks.

4.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

4.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ liegen vergleichsweise viele beschlossene Anpassungsmaßnahmen im APA III vor. So werden verschiedene Maßnahmen zur Anpassung der Bundeswasserstraßen (wie beispielsweise das Climate Proofing (APA III: 2.5-2.18) oder der Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“ (APA III: 5.4)) aufgeführt. Weiterhin sind Maßnahmen zur Anpassung des Verkehrsträgers Schiene (wie beispielsweise die Erfassung der Vulnerabilität der Schieneninfrastruktur (APA III: 2.3)) und Straße (zum Beispiel die Optimierung der Straßenentwässerung für Starkregenereignisse (APA III: 2.31)) genannt. Zusätzlich werden Maßnahmen im Bereich der Verkehrsforschung aufgeführt. So tragen Forschungsvorhaben wie das Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertenetzwerk (APA III: 2.19) zur Wissensbildung und -erweiterung hinsichtlich der Klimawirkungen, des Anpassungsbedarfes und ausgewählter Anpassungsmaßnahmen bei.

Gleichzeitig findet eine Orientierung am Bundesverkehrswegeplan 2030 statt, welcher die verkehrspolitische Planung bis 2030 skizziert (BBSR 2016; BMVI 2016a). In diesem Zusammenhang ist auch vorgesehen, Datengrundlagen zur Berücksichtigung von Klimawirkungen bei der Projektdefinition in der Bundesverkehrswegeplanung zu schaffen und Aspekte der Klimaanpassung bei Investitionen nach Bundesverkehrswegeplan zu berücksichtigen (APA III: 2.22 und 2.26).

Weiterreichende Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ lassen sich nach Verkehrsträger gliedern. Für den Verkehrsträger Wasserstraße sind mögliche Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung unter anderem im Bereich der flussbaulichen Anpassung angesiedelt. Im Schienenverkehr kann eine Anpassung unter anderem über technische Maßnahmen an den Schienen und Zügen, wie zum Beispiel dem Weißen von Schienen, oder über Maßnahmen des Vegetationsmanagements erreicht werden (Hoffmann et al. 2019). Weiterreichende Anpassungsmaßnahmen im Straßenverkehr können sowohl bei baulichen Aspekten (zum Beispiel durch angepasste Asphaltmischungen) als auch bei technischen Maßnahmen zur Schadensminderung (zum Beispiel durch Muren- und Steinschlagschutz) ansetzen (STMUG 2009; Rotter et al. 2011b). Im Rahmen der Arbeiten des BMVI-Expertenetzwerks wurden verschiedene Anpassungsmaßnahmen diskutiert. Diese umfassten informatorische, regulatorische, ingenieurtechnische Ansätze sowie das operative Management der Verkehrsinfrastruktur und des Verkehrsbetriebs (Hänsel et al. 2020; Norpoth et al. 2020).

Insgesamt setzt weiterreichende Anpassung im Handlungsfeld besonders in der Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ an. Rechtliche Grundlagen können zudem die Rahmenbedingungen für Anpassung begünstigen (Rotter et al. 2011b; Norpoth et al. 2020). Neben den genannten Maßnahmen für die einzelnen Verkehrsträger spielen auch integrative Verkehrskonzepte eine bedeutende Rolle für Anpassung im Handlungsfeld (BDB et al. 2020). Zum Umgang mit Unsicherheiten wird die Umsetzung von sogenannten low-regret-Maßnahmen und die Möglichkeit der Verwendung von flexiblen Elementen empfohlen, zum Beispiel die modulare Erhöhung von Bauwerken oder der temporäre Einsatz von Schlauchwehren (BBSR 2016; Norpoth et al. 2020).

Betrachtet man die Relevanz der einzelnen Anpassungsdimensionen für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, so spielen neben den oben genannten Aspekten zusätzlich die Dimensionen „Motivation und Akzeptanz“ und „Finanzielle Ressourcen“ eine wichtige Rolle (Rotter et al. 2011b; Hänsel et al. 2020).

Hindernisse und Grenzen der Anpassung im Handlungsfeld können insbesondere bei größeren Infrastrukturmaßnahmen auftreten. Wie bei jedem Großprojekt können Hindernisse bei der Maßnahmenplanung und -genehmigung auftreten (Hänsel et al. 2020).

Weiterführende verkehrsträgerübergreifende Maßnahmen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ könnten unter anderem verstärkt bei Konzepten des kombinierten Verkehrs ansetzen. Eine flächendeckende Ermöglichung des intermodalen Verkehrs kann eine flexible Anpassung an auftretende Klimafolgen erlauben. So kann bei witterungsbedingten Einschränkungen des einen Verkehrsträgers eine Ladeinheit schnell auf einen anderen Verkehrsträger verlagert werden (BDB et al. 2020). Ansatzpunkte transformativer Anpassung können sich in Zusammenhang mit Klimaschutzmaßnahmen im Verkehrssektor ergeben. Klimafreundliche Mobilitätskonzepte, welche zugleich durch den Einsatz innovativer Technologien eine hohe Anpassungskapazität aufweisen, können zur klimaresilienten Weiterentwicklung des Verkehrssektors beitragen.

Insgesamt ist das Spektrum der beschlossenen beziehungsweise weiterreichenden Maßnahmen im Handlungsfeld relativ homogen. Es handelt sich oft um technologische Maßnahmen oder bauliche Anpassungen der Verkehrsinfrastruktur. Weiterhin haben die Wissensgewinnung durch Forschungsvorhaben und die Schaffung rechtlicher Grundlagen eine hohe Bedeutung (Rotter et al. 2011b; BBSR 2016; Hänsel et al. 2020).

4.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ wurde lediglich eine Klimawirkung hinsichtlich der Anpassungskapazität untersucht, sodass keine vergleichende Betrachtung innerhalb des Handlungsfeldes möglich ist. Dennoch ergeben sich Zusammenhänge zu zahlreichen Klimawirkungen in anderen Handlungsfeldern. So besteht ein enger Zusammenhang mit der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warentransports auf Wasserstraßen (Inland)“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“. Hier lässt sich eine direkte Wirkbeziehung zwischen Einschränkungen der Schifffbarkeit der Binnenwasserstraßen aufgrund von Niedrigwasserereignissen und möglichen Verzögerungen im inländischen Warentransport über Wasserstraßen feststellen. Dies wird auch dadurch deutlich, dass einige der beschlossenen Maßnahmen auch den Warentransport adressieren. Weitere beschlossene Maßnahmen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, wie beispielsweise die Arbeiten im Rahmen der Erstellung und Aktualisierung der Hochwassergefahrenkarten, stehen zudem in Zusammenhang mit Klimawirkungen aus dem Handlungsfeld „Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft“.

Im Bereich der weiterreichenden Anpassungsmaßnahmen ergeben sich unter anderem Wirkbeziehungen zu Klimawirkungen aus den Handlungsfeldern „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“.

4.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Bei Betrachtung der drei Querschnittsfelder lässt sich feststellen, dass insbesondere die Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ beitragen. So können diese bei Anpassungsprozessen, welche eine Flächenänderung erfordern, unterstützen. Im Bereich der Hochwasserrisiken und Extremwetterereignisse können Methoden der Raumplanung als Ansätze zur regionalen Risikokartierung erwogen werden (Rotter et al. 2011b). Der Bevölkerungs- und Katastrophenschutz trägt durch die regelmäßig durchgeführten Risikoanalysen, welche auch Themenbereiche wie ein ext-

remes Dürreszenario aufgreifen, zur Stärkung der Anpassungskapazität bei (APA III: 6.4). Weiterhin können angepasste Notfall- und Rettungspläne im Schadensfall die Bewältigung von beispielsweise Hochwasserereignissen verbessern (Rotter et al. 2011b).

4.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 57: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

 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			gering-mittel	gering	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Klimawirkung			Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
				optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
	Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Niedrigwasser)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
		Gewissheit		mittel		gering		
	Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Hochwasser)	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	10-50 Jahre
		Gewissheit		mittel		gering		
	Schiffbarkeit der Seeschiffahrtsstraßen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	10-50 Jahre
		Gewissheit		mittel		gering		
	Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
		Gewissheit		mittel		gering		
	Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (gravitative Massenbewegungen)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
		Gewissheit		mittel		gering		
	Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
		Gewissheit		gering		gering		
	Schäden an Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	10-50 Jahre
		Gewissheit		mittel		gering		

Tabelle 58: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

	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	mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)	mittel	mittel-hoch	mittel	hoch	hoch	ja
		mittel-hoch	hoch			

Tabelle 59: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegen- wart	2031-2060		2020- 2030	2031-2060			
		optimis- tisch	pessimis- tisch		optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering	gering-mittel	gering	gering
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)	mittel	mittel	hoch	gering	gering	mittel	gering	gering

4.5 Quellenverzeichnis

- Ademmer, M.; Boysen-Hogrefe, J.; Fiedler, S.; Groll, D.; Jannsen, N.; Kooths, S.; Potjagailo, G. (2018): Aufschwung stößt an Grenzen – Belebung nur temporär. Kasten: Zum Einfluss des Niedrigwassers auf die Konjunktur. Institut für Weltwirtschaft Kiel (IFW), Kiel.
- Agora Verkehrswende (Hrsg.) (2018): Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030, Berlin.
- 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.
- Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Alfieri, L.; Feyen, L.; Dottori, F.; Bianchi, A. (2015): Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change* 35, S. 199–212. doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004.
- Bardt, H.; Biebler, H.; Haas, H. (2013): Einfluss des Klimawandels auf die deutsche Energieversorgung. *Wirtschaftsdienst* 93 (5/2013), S. 307–314. doi:10.1007/s10273-013-1526-0.
- Bardt, H.; Chrischilles, E.; Mohammadzadeh, M. (2012): Klimawandel und Unternehmen. *Wirtschaftsdienst* 92 (13/2012), S. 29–36. doi:10.1007/s10273-012-1347-6.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hrsg.) (2017): Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen, Augsburg.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (STMUG) (Hrsg.) (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS), München.
- Belz, J.-U.; Adler, M.; Baschek, B.; Bergfeld-Wiedemann, T.; Brockmann, H.; Busch, N.; Claes, J.; Daedlow, K.; Hammer, M.; Hatz, M.; Hillebrand, G.; Hübner, G.; Klein, B.; Kleisinger, C.; Krahe, P.; Larina-Pooth, M.; Meißner, D.; Mothes, D.; Mürlebach, M.; Nilson, E.; Otto, W.; Promny, M.; Rademacher, S.; Schöl, A.; Schriever, S.; Schubert, B.; Schwandt, D.; Viergutz, C. (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: : Dokumentation und Analyse. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/BFG_MITTEILUNGEN_31.2014.
- BinSchStrO: Binnenschiffahrtsstraßen-Ordnung vom 21.09.2018. Ursprünglich gefasst 16.12.2011.
- Blöschl, G.; Hall, J.; Viglione, A.; Perdigão, R. A. P.; Parajka, J.; Merz, B.; Lun, D.; Arheimer, B.; Aronica, G. T.; Bilibashi, A.; Boháč, M.; Bonacci, O.; Borga, M.; Čanjevac, I.; Castellarin, A.; Chirico, G. B.; Claps, P.; Frolova, N.; Ganora, D.; Gorbachova, L.; Gül, A.; Hannaford, J.; Harrigan, S.; Kireeva, M.; Kiss, A.; Kjeldsen, T. R.; Kohnová, S.; Koskela, J. J.; Ledvinka, O.; Macdonald, N.; Mavrova-Guirguinova, M.; Mediero, L.; Merz, R.; Molnar, P.; Montanari, A.; Murphy, C.; Osuch, M.; Ovcharuk, V.; Radevski, I.; Salinas, J. L.; Sauquet, E.; Šraj, M.; Szolgay, J.; Volpi, E.; Wilson, D.; Zaimi, K.; Živković, N. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573 (7772), S. 108–111. doi:10.1038/s41586-019-1495-6.
- 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 Bevölkerungsschutz (BABS) (Hrsg.) (2015): Nationale Gefährdungsanalyse - Gefährdungsdossier Sturm.
- Bundesamt für Güterverkehr (BAG) (Hrsg.) (2019): Marktbeobachtung Güterverkehr. Jahresbericht 2018, Köln.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (2020): Niedrigwasserbericht Bericht 2011-2018. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), 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.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (2015a): BAWBildatlas: Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD - Band 1 - Sensitivitätsstudien zum Meeresspiegelanstieg in den Ästuaren Elbe, Jade-Weser und Ems. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (2015b): BAWBildatlas: Ergebnisse aus KLIWAS und KLIMZUG-NORD - Band 2 - Sensitivitätsstudien zum Meeresspiegelanstieg bei Sturmflut im Elbe-Ästuar, Karlsruhe.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.) (2018): BAW-Bildatlas. Eine Sensitivitätsstudie vor dem Hintergrund des Klimawandels, Karlsruhe.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016): Querauswertung zentraler Verbundvorhaben des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel mit Fokus Stadt- und Regionalentwicklung. BBSR-Online-Publikation 04/2016, Bonn.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hrsg.) (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2005): Objektkatalog der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung aus Verwaltungsvorschrift VV- WSV 1102, Berlin, Bonn.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2014): Grundkonzeption für den Bundesverkehrswegeplan 2015, Bonn.

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 und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2018a): Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks. Wissen - Können - Handeln, Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2018b): Verkehr in Zahlen 2018/2019. 47. Jahrgang. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR); Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Flensburg.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2019): Verkehr in Zahlen 2019/2020. 48. Jahrgang. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR); Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Flensburg.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2020): Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs, Stand: 1. Januar 2020, 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.) (2011): Siebte Nationale Maritime Konferenz. Dokumentation Nr. 597, 27. und 28. Mai 2011, Wilhelmshaven, Berlin.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2016): Nationales Hafenkonzept für die See- und Binnenhäfen 2015.
- 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.
- Church, J. A.; Clark, P.; Cazenave, A.; Gregory, J.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M.; Milne, G.; Nerem, R. S.; Nunn, P.; Payne, A.; Pfeffer, W.; Stammer, D.; Unnikrishnan, A. (2013): Sea level change. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Deutscher Bundestag (2013): Bundestagdrucksache 18/208: Unterrichtung durch die Bundesregierung. Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2013. Drucksache 18/208, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2014): Bundestagdrucksache 18/3682: Unterrichtung durch die Bundesregierung. Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2014. Drucksache 18/3682, Berlin.
- Dikau, R.; Glade, T. (2003): Nationale Gefahrenhinweiskarte gravitativer Massenbewegungen: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Relief, Boden und Wasser. Institut für Länderkunde, Leipzig.
- DonauSchPV: Donauschifffahrtspolizeiverordnung vom 21.9.2018. Ursprünglich gefasst 27.05.1993.
- Eisenbahn-Bundesamt (EBA) (Hrsg.) (2019): Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes. EBA Forschungsbericht 2018-13, Bonn.
- 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.
- Feyen, L.; Dankers, R.; Bódis, K.; Salamon, P.; Barredo, J. I. (2012): Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change* 112 (1), S. 47–62. doi:10.1007/s10584-011-0339-7.
- 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.
- Follmer, R.; Gruschwitz, D. (2019): Mobilität in Deutschland -MiD Kurzreport. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn, Berlin.
- Genske, D. D. (2017): Massenbewegungen. In: K. J. Witt (Hrsg) Grundbau-Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Berlin, Germany. S. 721–813. doi:10.1002/9783433607275.ch11.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2018): Naturgefahrenreport 2018. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.
- Glade, T.; Dikau, R. (2001): Gravitative Massenbewegungen – vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 145 (6), S. 42–53.
- Gönnert, G.; Graßl, H.; Kelletat, D.; Kunz, H.; Probst, B.; Storch, H. von; Sündermann, J. (Hrsg.) (2004): Klimaänderung und Küstenschutz, Hamburg.

- Grinsted, A.; Jevrejeva, S.; Riva, R. E.; Dahl-Jensen, D. (2015): Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. *Clim. Res.* 64 (1), S. 15–23. doi:10.3354/cr01309.
- Hamburg Port Authority (HPA) (2015): Sperr- und Räumzonen bei Hochwasser im Hamburger Hafen, Hamburg.
- Hamburg Port Authority (HPA) (Hrsg.) (2018): Global denken, Regional handeln. Nachhaltigkeitsbericht 2015/2016, Hamburg.
- 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-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016-2019. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.
- Heymann, E. (2008): Welche Branchen sind besonders vom Klimawandel betroffen? *uwf* 16 (2), S. 65–70. doi:10.1007/s00550-008-0077-0.
- 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.
- Hoffmann, E.; Rotter, M.; Glahe, J. (2011): Der Klimawandel und seine Folgen - Herausforderungen für den Schienenverkehr. Dokumentation des Branchenworkshops Schienenverkehr vom 8. Februar 2011. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW); Universität Oldenburg, Berlin/ Oldenburg.
- Hoffmann, E.; Rotter, M.; Welp, M. (2009): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Verkehrsinfrastruktur -. Umweltbundesamt (UBA), Berlin, Eberswalde.
- Hunger, E. (2007): Stromversorgungsanlagen der Infrastruktur. In: L. Fendrich (Hrsg) *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin, Heidelberg. S. 463–521. doi:10.1007/978-3-540-31707-4_10.
- Hütter, A. (2016): Güterverkehr in Deutschland 2014. WISTA 1.
- Ickert, L.; Matthes, U.; Rommerskirchen, S.; Weyand, E.; Schlesinger, M.; Limbers, J. (2007): Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Basel.
- Karczmarzyk, A.; Pfriem, R. (Hrsg.) (2011): Klimaanpassungsstrategien von Unternehmen. Metropolis-Verlag, Marburg.
- 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.
- Klose, M.; Damm, B.; Terhorst, B. (2015): Landslide cost modeling for transportation infrastructures: a methodological approach. *Landslides* 12 (2), S. 321–334. doi:10.1007/s10346-014-0481-1.
- 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.
- Krauter, E.; Kumerics, C.; Feuerbach, J.; Lauterbach, M. (2012): Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen. Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.238/2009/AP. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; Wirtschaftsverl. NW. Verl. für neue Wiss, Hannover, Bremerhaven.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg.) (2018): Länderübergreifendes Hochwasserportal. Ab wann meldet ein Pegel Hochwasser? Download unter <https://www.hochwasserzentralen.de/info.htm>. Stand: 05.02.2020.

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-Experten Netzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). doi:10.5675/ExpNLA2020.2020.06.

Lorenz, D. F. (2010): Kritische Infrastrukturen aus Sicht der Bevölkerung. Schriftenreihe Forschungsforum Öffentliche Sicherheit 3. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin.

Mahammadzadeh, M.; Biebler, H. (2009): Anpassung an den Klimawandel. iw Analysen - Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln Nr. 57. IW-Analysen 57. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Köln.

MoselSchPV: Moselschiffahrtspolizeiverordnung vom 30.4.2019. Ursprünglich gefasst 03.09.1997.

Nilson, E.; Astor, B.; Bergmann, L.; Fischer, H.; Fleischer, C.; Haunert, 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-Experten Netzwerks. 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.

Nilson, E.; Lingemann, I.; Klein, B.; Krahe, P. (2013): Impact of Hydrological change on navigation conditions. ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – FP7. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG); European Commission (EC), Brüssel.

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 Bundesverkehrssystems an den Klimawandel. Schlussbericht des Schwerpunktes 107 "Anpassungsoptionen" im Themenfeld 1 des BMVI-Experten Netzwerks. BMVI-Experten Netzwerk.

Oppenheimer, M.; Glavovic, B.; Hinkel, J.; van de Wal, R.; Magnan, 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.

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.

Peter, M.; Guyer, M.; Füssler, J. (2019): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland. Erster Teilbericht: Die Wirkungsketten in der Übersicht. Climate Change 20/2019, Dessau-Roßlau.

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.

Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Tignor, M.; Poloczanska, E.; Mintenbeck, K.; Nicolai, M.; Okem, A.; Petzold, J.; Rama, B.; Weyer, N. (Hrsg.) (2019): The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

- Proff, H.; Schönharting, J.; Schramm, D.; Ziegler, J. (Hrsg.) (2012): Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität. Betriebswirtschaftliche und technische Aspekte. Springer Gabler Verlag, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-8349-7117-3.
- 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.
- RheinSchPV: Rheinschiffahrtspolizeiverordnung vom 6.6.2019. Ursprünglich gefasst 19.12.1994.
- 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.
- Rotter, M.; Glahe, J.; Hoffmann, E. (2011a): Klimawandel: Was kommt zukünftig auf die Verkehrsbranche zu? Der Nahverkehr (5), S. 14–17.
- Rotter, M.; Hoffmann, E.; Welp, M. (2011b): KomPass Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. Verkehr.
- Rudolph, E. (2014): Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. Die Küste (81), S. 291–300.
- Schade, W.; Peters, A.; Doll, K.; Klug, S.; Köhler, J.; Krail, M. (2011): VIVER – Vision für nachhaltigen Verkehr in Deutschland. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Schipek, M.; Kallmeier, E. (2019): Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweis-karte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz. Schlussbericht zum Forschungspro- jekt FE-Nr. 89.0338/2017/. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), (unveröffentlicht).
- Schröder, A.; Hirschfeld, J. (2014): Anpassung der deutschen Ostseehäfen an die Folgen des Klimawandels. RA- DOST-Berichtsreihe Bericht 32, Berlin.
- Schröder, M.; Wurms, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabe- dingte Veränderungen des Abflussregimes am Beispiel des Rheins zwischen Mainz und St. Goar: Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW); Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_45/2014_4.03.
- Schubert, M.; Kluth, T.; Nebauer, G.; Ratzenberger, R.; Kotzagiorgis, S.; Butz, B.; Schneider, W.; Leible, M. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Abschlussbericht, Berlin.
- Seiffert, R.; Hesser, F. (2014): Investigating Climate Change Impacts and Adaptation Strategies in German Estua- ries. Die Küste (81), S. 551–563.
- Seiffert, R.; Hesser, F.; Büscher, A.; Fricke, B.; Holzwarth, I.; Rudolph, E.; Sehili, A.; Seiß, G.; Winkel, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der See- schifffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02, KLIWAS-36/2014, Koblenz. doi:10.5675/Kli- was_36/2014_3.02.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Statistikportal) (Hrsg.) (2020): Seeverkehr. Ein- und Ausgestie- gene Fahrgäste nach Fahrtgebieten. Download unter <https://www.statistikportal.de/de/transport-und-ver- kehr/seeverkehr>. Stand: 03.04.2020.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018): Statistisches Jahrbuch 2018. Transport und Verkehr. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019): Statistisches Jahrbuch 2019. Transport und Verkehr. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

- 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).
- Thieken, A. (2015): Das Hochwasser im Juni 2013. Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. DKKV, Bonn.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.
- Vogt, J.; Keller, S.; Atzl, A. (2016): Entwicklung modellhafter Anpassungsstrategien der regionalen Straßeninfrastruktur in der Metropolregion Stuttgart an den Klimawandel. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Stuttgart.
- Vousdoukas, M. I.; Mentaschi, L.; Voukouvalas, E.; Verlaan, M.; Feyen, L. (2017): Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future* 5 (3), S. 304–323. doi:10.1002/2016EF000505.
- 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.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (Hrsg.) (2020): Das Projekt Fahrrinnenanpassung 2019. Download unter <https://www.fahrrinnenanpassung.de/bedarf-und-planung.html>. Stand: 17.04.2020.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV); Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) (Hrsg.) (o.J.): Bundeswasserstraßen. Download unter https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/wasserstrassen/01_bundeswasserstrassen/bundeswasserstrassen-node.html. Stand: 01.04.2020.
- Weiher, B. (2018): Hafen Hamburg, Schifffahrt und Verkehr. In: H. von Storch, I. Meinke, M. Claußen (Hrsg.) *Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Berlin. S. 225–240. doi:10.1007/978-3-662-55379-4_11.
- Weller, B.; Fahrion, M.-S.; Horn, S.; Naumann, T.; Nikolowski, J. N. (2016): *Baukonstruktion im Klimawandel*. Springer Vieweg, Wiesbaden.