



GWS RESEARCH REPORT 2022/02

Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel: Szenarioanalyse bis 2050

Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland

Dr. Markus Flaute
Saskia Reuschel
Dr. Britta Stöver

Impressum

AUTORINNEN UND AUTOREN

Dr. Markus Flaute

Tel: +49 (541) 40933-295, E-Mail: flaute@gws-os.com

Saskia Reuschel

Tel: +49 (541) 40933-283, E-Mail: reuschel@gws-os.com

Dr. Britta Stöver

Tel: +49 (541) 40933-250, E-Mail: stoever@gws-os.com

TITEL

Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel: Szenarioanalyse bis 2050 - Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, Dezember 2022

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die in diesem Papier vertretenen Auffassungen liegen ausschließlich in der Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der GWS mbH wider.

DANKSAGUNG

Das Team dankt den Reviewerinnen und Reviewern des Projektes (Dr. Olaf Burghoff, Dr. Horst Gömann, Dr. Markus Groth, Prof. Dr. Dea Niebuhr, Prof. Dr. Annegret Thieken und Dr. Leonie Wenz) für die hilfreichen Anmerkungen und Kommentare.

HERAUSGEBER DER GWS RESEARCH REPORT SERIES

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

ISSN 2196-4262

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Methodik	3
2.1 Hintergrund und Ziele	3
2.2 Konzeptioneller Rahmen	5
2.2.1 Das Modell INFORGE/PANTA RHEI	5
2.2.2 Szenarioanalyse	6
2.2.3 Grenzen ökonomischer Modellanalysen	8
2.3 Klimaprojektionen, Extremwetterereignisse und Schadenskategorien	9
2.4 Auswahl von klimawandelbedingten Wirkungen	12
3 Modellbasierte ex-ante Untersuchung der volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland: Schadenskosten	18
3.1 Quantifizierung der ausgewählten Wirkungen und Risiken	18
3.1.1 Ertragsausfälle in der Landwirtschaft	21
3.1.2 Holzertrag in der Forstwirtschaft	23
3.1.3 Schäden an Gebäuden und Infrastruktur	24
3.1.3.1 Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen	24
3.1.3.2 Beschädigung oder Zerstörung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste	26
3.1.3.3 Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser	27
3.1.3.4 Klimawirkungsübergreifende Quantifizierung	28
3.1.4 Binnenschifffahrt und Warenverkehr	31
3.1.4.1 Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtstraßen (Niedrigwasser) und Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	31
3.1.4.2 Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	32
3.1.5 Auswirkungen auf das Gesundheitssystem	34
3.2 Volkswirtschaftliche Folgekosten: Schadensszenarien	36

3.2.1	Ertragsausfälle in der Landwirtschaft	37
3.2.2	Forstwirtschaft	40
3.2.3	Schäden an Gebäuden und Infrastruktur	42
3.2.4	Binnenschifffahrt und Warenverkehr	46
3.2.4.1	Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtstraßen (Niedrigwasser)	46
3.2.4.2	Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	48
3.2.5	Gesundheitssystem	51
3.2.6	Gesamtschau der volkswirtschaftlichen Folgekosten	54
3.2.6.1	Folgekosten gemessen am BIP und der Beschäftigung	54
3.2.6.2	Auswirkungen auf Ungleichheit	56
3.2.6.3	Folgen für die UN-Nachhaltigkeitsziele	58
3.2.7	Mögliche Entwicklungen bis zum Jahr 2100	60
4	Modellbasierte ex-ante Untersuchung der volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland: Anpassungskosten	64
4.1	Klimawandel und Anpassung: Ein Perspektivenwechsel	64
4.2	Quantifizierung von ausgewählten Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel	66
4.3	Volkswirtschaftliche Folgekosten: Anpassungsszenarien	73
4.3.1	Landwirtschaft	74
4.3.2	Forstwirtschaft	75
4.3.3	Gesundheitssystem	76
4.3.4	Gebäude und Infrastruktur	77
4.3.5	Forschung und bauplanerische Massnahmen	79
4.3.6	Gesamtschau der volkswirtschaftlichen Folgekosten durch Anpassung	79
5	Fazit und Ausblick	82
6	Literaturverzeichnis	86
	Anhang	96

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Lösungsraum für plausible Zukünfte, wahrscheinliche Zukünfte und Szenarien als eine mögliche Entwicklung der Zukunft	4
Abbildung 2: Aufbau und Struktur des Modells INFORGE / PANTA RHEI im Überblick	6
Abbildung 3: Referenzszenario, Alternativszenario und Abweichungen	7
Abbildung 4: Filterprozess zur Auswahl der Klimawirkungen	13
Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der direkten, indirekten und induzierten Effekte im Modellzusammenhang	19
Abbildung 6: Darstellung der Klimawirkungen im Modellzusammenhang	20
Abbildung 7: Quantifizierung der durch Schäden an Gebäuden und Infrastruktur ausgelösten Folgewirkungen	31
Abbildung 8: Volkswirtschaftliche Folgen durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Landwirtschaft – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050	38
Abbildung 9: Arbeitsmarktfolgen der klimawandelbedingten Ertragsausfälle in der Landwirtschaft – Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Wirtschaftsbereichen in Tsd. Personen, 2030 und 2050	39
Abbildung 10: Volkswirtschaftliche Folgen durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050	40
Abbildung 11: Folgen der klimawandelbedingten Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft für die Produktionsstruktur – Wirkungen auf die reale Produktion nach Wirtschaftsbereichen in Mrd. Euro, 2030 und 2050	42
Abbildung 12: Volkswirtschaftliche Folgen durch Schäden an Gebäuden durch Extremwetterereignisse – Wirkungen auf das reale BIP in Mrd. Euro in den Jahren 2030 und 2050	44
Abbildung 13: Volkswirtschaftliche Folgen durch Schäden an Gebäuden durch Extremwetterereignisse – Wirkungen auf die Erwerbstätigen in Prozent in den Jahren 2030 und 2050	45
Abbildung 14: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen durch Niedrigwasser – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050	47

Abbildung 15: Auswirkungen von klimawandelbedingten Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen durch Niedrigwasser für die Produktionsstruktur – Wirkungen auf die reale Produktion nach Wirtschaftsbereichen in Mio. Euro, 2030 und 2050	48
Abbildung 16: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen des internationalen Handels – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050	49
Abbildung 17: Folgen der klimawandelbedingten Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs für die Produktionsstruktur – Wirkungen auf die reale Produktion nach Wirtschaftsbereichen in Mrd. Euro, 2030 und 2050	51
Abbildung 18: Veränderung der Staatsausgaben nach Aufgabenbereichen durch Erhöhungen der Ausgaben für hitzebedingte Krankenhausaufenthalte in den Jahren 2030 und 2050, in Mio. Euro (auf 10 gerundet)	52
Abbildung 19: Darstellung der Arbeitsunfähigkeitstage nach ICD-10 T67 und Anzahl Heißer Tage, 2011-2019	53
Abbildung 20: Kumulierte Wirkungen der hitzebedingten Zunahme von Arbeitsunfähigkeitstagen auf das reale BIP, 2022-2050	53
Abbildung 21: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel – Wirkungen auf das reale BIP in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) in den Jahren 2030 und 2050	54
Abbildung 22: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel – Wirkungen auf die Erwerbstätigen in Prozent in den Jahren 2030 und 2050	56
Abbildung 23: Folgen des Klimawandels für das Erreichen ausgewählter UN-Nachhaltigkeitsindikatoren, Basisverlauf (ohne Klimawandel) = 100, Vergleich der Entwicklung 2050 gegenüber 2021	59
Abbildung 24: Quantifizierung der durch Schäden an Gebäuden und Infrastruktur ausgelösten Folgewirkungen- Anpassungsszenario	71
Abbildung 25: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel in der Landwirtschaft – Kumulierte Wirkungen für den Zeitraum 2022-2050 in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) auf das reale BIP für die Szenarien ohne und mit Anpassung	74
Abbildung 26: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel in der Landwirtschaft – Wirkung auf die Gesamtzahl der Erwerbstätigen (in Tsd., auf 10 gerundet) für 2030 und 2050	75
Abbildung 27: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den	

Klimawandel in der Forstwirtschaft – Kumulierte Wirkungen für den Zeitraum 2022-2050 in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) auf das reale BIP für die Szenarien ohne und mit Anpassung	76
Abbildung 28: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel in der Forstwirtschaft – Wirkung auf die reale Produktion (in Mrd. Euro, auf 10 gerundet) für 2030 und 2050	76
Abbildung 29: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel im Gesundheitssystem – Kumulierte Wirkungen auf das reale BIP für die Szenarien ohne und mit Anpassung für den Zeitraum 2022-2050 in Mrd. Euro, gerundet	77
Abbildung 30: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel bei Gebäuden und Infrastruktur – Kumulierte Wirkungen auf das reale BIP in Mrd. Euro für die Jahre 2022 bis 2050 für die Szenarien ohne und mit Anpassung	78
Abbildung 31: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel bei Gebäuden und Infrastruktur – Wirkungen auf die Beschäftigung in Prozent in den Jahren 2030 und 2050 für die Szenarien ohne und mit Anpassung	78
Abbildung 32: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung – Kumulierte Wirkung auf das reale BIP in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für den Zeitraum 2022-2050, 2050	79
Abbildung 33: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Anpassung – Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen in Tausend in den Jahren 2030 und 2050	80

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kategorien von Klimafolgekosten und Dimensionen möglicher Schäden	11
Tabelle 2: Auswahl der Klimawirkungen für die weitere Analyse	17
Tabelle 4: Bandbreite der projizierten jährlichen Änderungen der Heißen Tage in Tagen pro Jahr relativ zur Referenzperiode 1971-2000 für Deutschland	35
Tabelle 5: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Landwirtschaft in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050	38
Tabelle 6: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des	

Klimawandels, 2050	40
Tabelle 7: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050	45
Tabelle 8: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen durch Niedrigwasser in Mrd. Euro, 2050	46
Tabelle 9: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen des internationalen Handels in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050	49
Tabelle 10: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch Klimawandel in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050	55
Tabelle 11: Abweichung vom Durchschnittseinkommen im Basisverlauf für verschiedene Haushaltstypen und Veränderung dazu in den Klimaszenarien für das Jahr 2050	58
Tabelle 12: Begriffsverständnis – Anpassungsziel, -maßnahme und -instrument	68
Tabelle 14: Klimawirkungen der KWRA 2021 nach Handlungsfeld	96
Tabelle 15: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Ertragsausfälle in der Landwirtschaft“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung	98
Tabelle 16: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung	99
Tabelle 17: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung	100
Tabelle 18: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung	101
Tabelle 19: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Hitzebelastung“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung	103

1 EINLEITUNG

Deutschland wurde in der nahen Vergangenheit von zahlreichen Extremwetterereignissen getroffen: Die Flusshochwasser an der Elbe 2002 und 2013 sowie an der Donau 2013, die Hitzewellen in den Jahren 2018, 2019 und 2022 verbunden mit Dürre sowie der Starkregen und die Sturzfluten im Jahr 2021 im Ahrtal und dem südlichen Nordrhein-Westfalen haben deutlich gemacht, dass die Folgen des Klimawandels auch in Deutschland zu spüren sind (Trenczek et al. 2022b). Extremwetterereignisse wie v.a. Hitze, Dürre, Starkregen und Flusshochwasser werden durch den Klimawandel in Zukunft sehr wahrscheinlich häufiger und intensiver auftreten (Brienen et al. 2020; Lange et al. 2020; IPCC 2021). Damit einhergehend werden die Schäden zunehmen, welche diese Extremwetterereignisse mit sich bringen und dadurch unmittelbar auf Gesellschaft, Umwelt und die Wirtschaft Einfluss nehmen.

Um auf die zunehmenden Folgen der Klimaveränderung angemessen reagieren zu können, helfen unterschiedliche Instrumente, Methoden und Modelle zur Entscheidungsunterstützung. Mit ihnen wird eine zielgerichtete Politikgestaltung möglich. Die monetären Folgen des Klimawandels sind dabei nur ein Ergebnis, welches bei der Ausgestaltung der Anpassungspolitik berücksichtigt werden sollte. Mit dem Berichtswesen zur deutschen Anpassungsstrategie sowie der Vulnerabilitätsstudie bzw. Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021) für Deutschland liegen Einschätzungen dazu vor, mit welchen unmittelbaren Risiken des Klimawandels Deutschland in Zukunft konfrontiert sein wird. Gleichzeitig werden auch Möglichkeiten aufgezeigt, wie diesen Risiken mit Anpassungen an den Klimawandel begegnet werden kann. Die KWRA 2021 liefert somit eine qualitative Einschätzung zu Klimarisiken, Anpassungskapazitäten und Handlungserfordernissen nach verschiedenen Handlungsfeldern. An dieser Stelle setzt die Analyse der vorliegenden Studie an. Ziel des Vorhabens „Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland“, in dessen Kontext die vorliegende Studie erscheint, ist die detaillierte Analyse und Quantifizierung klimawandelbezogener Schadens- und Anpassungskosten in Deutschland. In dieser Studie liegt der Fokus insbesondere auf der ex-ante Untersuchung der volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels. Im Rahmen des Vorhabens wurden bereits eine systematische Kategorisierung sowie Priorisierung der Kostendimensionen von Klimaschäden (Hirschfeld et al. 2021b; Hirschfeld et al. 2021a), eine Übersicht über vergangene Extremwetterschäden (Trenczek et al. 2022b) sowie zwei Detailuntersuchungen zu den Hitzesommern 2018 und 2019 (Trenczek et al. 2022c) und zu den Sturzfluten 2021 (Trenczek et al. 2022a) erarbeitet.

Mit einer modellbasierten Untersuchung wird im Folgenden der Frage nachgegangen, mit welchen volkswirtschaftlichen Kosten die deutsche Volkswirtschaft in der Zukunft bei unterschiedlichen Klimawandel-Entwicklungsszenarien (schwach, mittel und stark) rechnen muss. Die Analyse umfasst sowohl die Schadens- als auch die Anpassungskosten. Die volkswirtschaftlichen Folgekosten umfassen dabei nicht nur die reinen direkten Folgekosten durch Klimawandel, sondern auch die indirekten und induzierten Folgekosten. So können unterschiedliche Wirkmechanismen und

Zusammenhänge in einer Volkswirtschaft in einem makroökonomischen Modell abgebildet werden: Heiße Temperaturen und Dürre sorgen nicht nur für Ertragsausfälle in der Landwirtschaft, sondern können auch zu steigenden Preisen führen, welche wiederum an nachgelagerte Stufen wie der Nahrungsmittelindustrie weitergegeben werden und dort für steigende Kosten, höhere Preise, Anpassungen bei der Produktion und einem geänderten Konsumverhalten sorgen. Zur Analyse und Bewertung der Folgekosten des Klimawandels wird das makroökonomische Input-Output Modell INFORGE/PANTA RHEI eingesetzt. Es gehört zur Gruppe der Input-Output basierten makroökonomischen Modelle und wird für Szenarien-Rechnungen herangezogen, in denen auf hohem sektoralen Detailgrad die Wechselwirkungen, Zweitrundeneffekte und andere Interdependenzen mit aufgezeigt werden sollen.

Als zentrales Ergebnis der Untersuchung kann festgehalten werden, dass die Klimawandelfolgen hohe Kosten für Deutschland mit sich bringen werden. Besonders starken Einfluss nehmen Effekte des Klimawandels, die zu nationalen und globalen Preissteigerungen führen wie z. B. durch Ertragsausfälle in der Landwirtschaft, durch Schäden an Gebäuden und Infrastruktur infolge von Starkregen, Überschwemmungen und Flut oder durch internationale Lieferengpässe bei Zwischenprodukten und Rohstoffen. Ein starker Klimawandel führt im Vergleich zu deutlich höheren Kosten als ein mittlerer oder schwacher Klimawandel. Neben den positiven Effekten des Klimaschutzes zeigt sich auch, dass Anpassungsmaßnahmen dazu beitragen können, die möglichen Schäden und Kosten der Klimawandelfolgen zu reduzieren. Sie sollten daher für alle Klimaszenarien überwiegend als lohnend eingestuft werden. Durch den modellbedingten Fokus auf monetär bewertbare zukünftige Schäden stellen die hier vorliegenden Ergebnisse eine Untergrenze dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Schäden unter Berücksichtigung nicht monetärer Größen, deutlich höher ausfallen werden. Des Weiteren sind die Unsicherheiten, sowohl was den Klimawandel angeht, als auch die Szenario-Annahmen zur Bewertung der Klimawandelfolgen, zum Teil sehr hoch. Obwohl die Ergebnisse vermeintlich genaue Zahlen liefern, sind sie eher als richtungsweisend zu interpretieren.

Der nachfolgende Bericht ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Methodik, d.h. die Zielsetzung, die modellgestützte Umsetzung, die Verbindung zu den Klimaprojektionen sowie der Auswahlprozess betrachteter Klimawirkungen. In Kapitel 3 werden die zu erwartenden Folgen des Klimawandels für die deutsche Wirtschaft bis 2050 quantifiziert, wobei erst die Annahmen und anschließend die Ergebnisse detailliert nach Klimawirkungen dargestellt werden. Kapitel 4 bezieht sich auf mögliche Anpassungsmaßnahmen vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus Kapitel 3 sowie deren Auswirkungen auf die ermittelten klimawandelbedingten Kosten. Kapitel 5 fasst die Vorgehensweise und die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick, wo auch in Zukunft noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

2 METHODIK

Inhalt dieser Studie ist eine modellbasierte ex-ante Untersuchung der volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland. In den folgenden Abschnitten werden daher kurz die Hintergründe und Ziele (Kapitel 2.1), der konzeptionelle Rahmen (Kapitel 2.2) sowie die Grundlagen zur Kategorisierung der Klimaschäden und möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen (Kapitel 2.3) dargestellt sowie die Auswahl der in dieser Studie betrachteten Klimawirkungen erläutert (Kapitel 2.4).

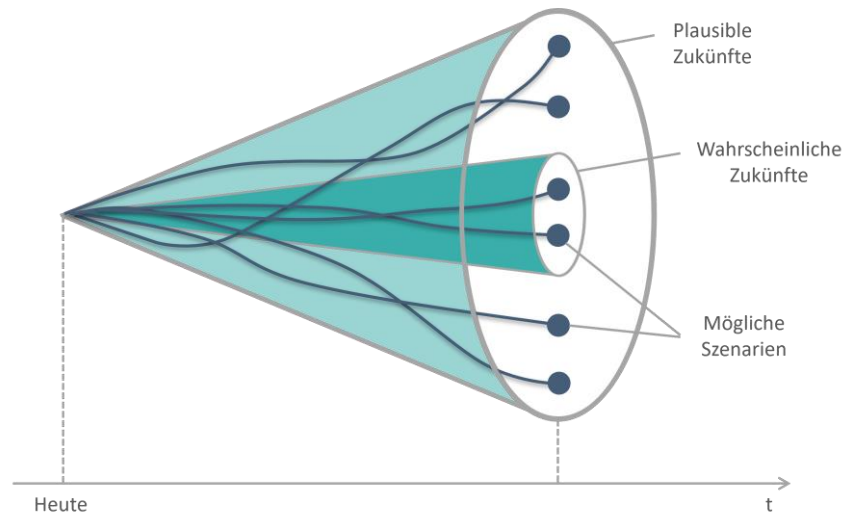
2.1 HINTERGRUND UND ZIELE

Die Wirkungen des Klimawandels haben sich gerade in der nahen Vergangenheit in Deutschland deutlich gezeigt. Extremwetterereignisse wie die außergewöhnlich heißen und trockenen Sommer in den Jahren 2018 und 2019 sowie die verheerenden Regenfälle und die Sturzflut im Ahrtal sowie dem südlichen Nordrhein-Westfalen im Jahr 2021 haben zu hohen Schäden in Deutschland geführt, die dem Klimawandel zugeordnet werden können (Trenczek et al. 2022b). Die in diesem Vorhaben geleisteten Arbeiten zur Abschätzung der ex-post entstandenen Schäden durch Extremwetter in Deutschland (Trenczek et al. 2022c) haben bereits verdeutlicht, dass eine Abschätzung der durch klimawandelbedingte Extremwetter entstandenen Schäden sehr komplex und nicht immer eindeutig möglich ist (Stichwort Attributionsforschung). Im Rahmen des relativ neuen Feldes der Attributionsforschung wird der Einfluss des voranschreitenden Klimawandel auf das Auftreten von Extremereignissen untersucht (siehe dazu Hirschfeld et al. (2021b) und Trenczek et al. (2022b)). Zudem ergeben sich neben materiellen Schäden auch immaterielle Schäden, die das Gesamtschadensausmaß erhöhen, aber nicht oder nicht hinreichend objektiv monetär bewertbar sind wie beispielsweise Todesfälle oder der Verlust von Biodiversität (Hirschfeld et al. 2021b).

Des Weiteren ist auch die Bewertung des klimawandelbedingten Risikos für die in der Klimawirkungs- und Risikoanalyse genannten Klimawirkungen jeweils mit hohen Unsicherheiten verbunden, da sowohl die Voraussicht auf die mögliche Entwicklung des Klimas als auch die Übersetzung dieser Erkenntnisse in eine Risikoabschätzung nur mit unterschiedlichen Annahmen und Einschätzungen von Expertinnen und Experten näherungsweise vorgenommen werden kann. Je weiter in die Zukunft geschaut wird, desto geringer ist der Grad der Gewissheit bei der Bewertung. Ein wesentlicher Punkt für diese Ungewissheit und Unsicherheit sind die vielen Einflussfaktoren und Stellschrauben, von denen die Entwicklung des Klimas in der Zukunft abhängt. Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse schätzt daher das Risiko sowohl für eine optimistische Entwicklung (schwacher Klimawandel) als auch für eine pessimistische Entwicklung (starker Klimawandel) ab, um so eine realistische Bandbreite für die Zukunftsaussagen präsentieren zu können. Auch Trenczek et al. (2022b) geben zur Bewertung der Schadenskosten für die Hitzesommer 2018 und 2019 eine Bandbreite der möglichen Kostenbereiche an, da die Ableitung nur eines Betrags aufgrund der hohen Unsicherheiten bei der Bewertung nicht möglich ist. Gleichzeitig enthält die Bewertung der Hitzesommer nur eine Auswahl wesentlicher Schäden und Schadenskosten, für die auch tatsächlich eine Quantifizierung durchführbar war.

Vor diesem Hintergrund erfolgt in dieser Studie die modellbasierte ex-ante Untersuchung der volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels. Dabei werden nicht nur die zukünftigen Schadenskosten für die Volkswirtschaft, sondern in einem zweiten Schritt auch die möglichen Anpassungskosten ermittelt. Ziel ist es, eine Einschätzung zu geben, welche volkswirtschaftlichen Effekte zukünftig möglich sind, wenn der Klimawandel in unterschiedlichen Intensitäten weiter voranschreitet und sich an den Klimawandel angepasst wird.

Abbildung 1: Lösungsraum für plausible Zukünfte, wahrscheinliche Zukünfte und Szenarien als eine mögliche Entwicklung der Zukunft



Quelle: überarbeitete Darstellung auf Basis von Boettcher et al. (2016)

Abbildung 1 veranschaulicht, die Herangehensweise in dieser Analyse: Verschiedenste Einflussgrößen, von denen das Klima nur eine Größe ist, definieren den möglichen Lösungsraum und eine mögliche Bandbreite für plausible Zukünfte. All diese Zukünfte können sich einstellen, jedoch gibt es in diesem Lösungsraum wahrscheinliche Zukünfte, die sich eben mit größerer Wahrscheinlichkeit einstellen werden, da man bereits heute erste Erkenntnisse zur möglichen Entwicklung in der Zukunft hat. Ein Szenario bildet wiederum nur einen einzigen Pfad in diesem Lösungsraum konsistent ab. Mit konkreten Annahmen und Informationen wird so jeweils eine mögliche Zukunftsentwicklung in einem Szenario dargestellt. Die Methodik der Szenarioanalyse wird in Kapitel 2.2.2 eingehender beschrieben.

Der Modellierungsrahmen ist durch das makro-ökonometrische Modell IN-FORGE/PANTA RHEI gegeben. Die modellbasierte Untersuchung der volkswirtschaftlichen Schadens- und Anpassungskosten wird für drei unterschiedliche Entwicklungen des Klimawandels für ausgewählte Klimawirkungen und ausgewählte Anpassungsmaßnahmen modellgestützt ermittelt. Bis zum Jahr 2100 werden Einschätzungen zur möglichen Entwicklung der volkswirtschaftlichen Folgekosten abgegeben. Die Aufstellung des gesamtwirtschaftlichen Schadens ergibt sich jeweils aus den auf Ebene einzelner Branchen stattfindenden Effekten, welche auf gesamtwirtschaftlicher Ebene zusätzlich Effekte zweiter Ordnung auslösen. So werden nicht nur die direkten ökonomischen Wirkungen in einzelnen ökonomischen Branchen erfasst, sondern durch die ökonomischen

Wechselwirkungen werden auch die indirekten und induzierten Effekte berücksichtigt. Es lassen sich so typische Indikatoren einer gesamtwirtschaftlichen Sicht wie das BIP, die Komponenten des BIP oder die Beschäftigung im Detail analysieren. Ein Überblick über den Aufbau und die Struktur des Modells INFORGE / PANTA RHEI findet sich im folgenden Kapitel im Abschnitt 2.2.1.

2.2 KONZEPTIONELLER RAHMEN

Für die Analyse der klimawandelbedingten volkswirtschaftlichen Folgekosten (Schadens- und Anpassungskosten) ist es zunächst erforderlich, den konzeptionellen Analyserahmen im Detail vorzustellen. Neben der Vorstellung des zum Einsatz kommenden makro-ökonometrischen Modells umfasst dieser Rahmen auch eine genaue Definition der einzelnen Begrifflichkeiten sowie die konsistente Entwicklung der möglichen Szenarien.

2.2.1 DAS MODELL INFORGE/PANTA RHEI

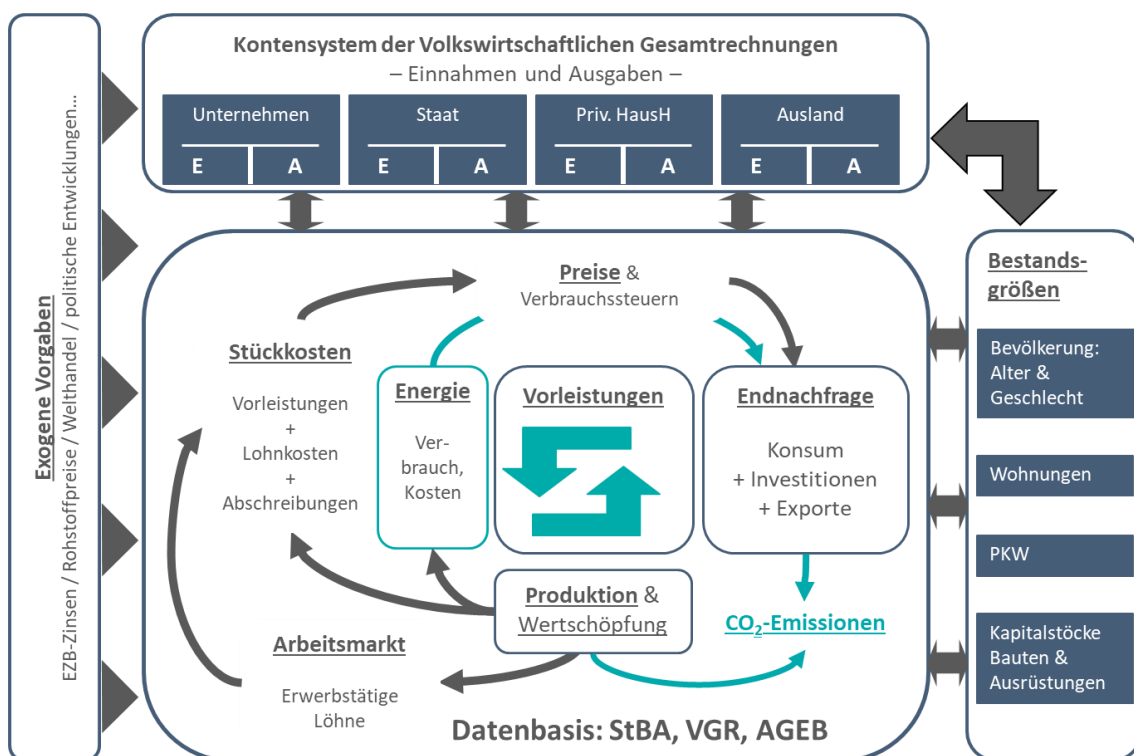
Zur Analyse und Bewertung der Folgekosten des Klimawandels wird das makroökonomische Input-Output Modell INFORGE/PANTA RHEI (im Folgenden nur noch als PANTA RHEI bezeichnet) eingesetzt. Es gehört zur Gruppe der Input-Output basierten makroökonomischen Modelle und wird wie die allgemeinen Gleichgewichtsmodelle (CGE) für Szenarien-Rechnungen herangezogen, in denen auf hohem sektoralen Detailgrad die Wechselwirkungen, Zweitrundeneffekte und andere Interdependenzen mit aufgezeigt werden sollen (Stöver et al. 2022). Im Bericht zu Arbeitspaket 3.1 des vorliegenden Projekts (Stöver et al. 2022) wurde dieser Modelltyp durch seine sektoral tiefe Gliederung, dem hohen Detailgrad und die weniger restriktive theoretische Fundierung als geeignet für die Analyse der Kosten des Klimawandels beschrieben. Anders als CGE-Modelle folgt PANTA RHEI als ökonometrisches Modell nicht dem neoklassischen Ansatz mit einer Gleichgewichtslösung (West 1995), sondern bedient sich vielmehr bei Ansätzen der Evolutionsökonomik (Nelson & Winter 1982) und unterstellt somit begrenzt rational agierende Agenten (Mönnig 2016).

Dadurch werden Preise in PANTA RHEI aufgrund von Marktunvollkommenheiten ausgelöst durch unvollständigen Wettbewerb, partiell starre Preise und Marktabhängigkeiten sowie beschränkten Informationen der Wirtschaftssubjekte durch stückkostenbasierte Mark-Up-Preissetzung bestimmt (Becker et al. 2022). Es wird keine Marktseite bevorzugt, indem die Produktionsmenge sowohl von der Angebots- als auch der Nachfrageseite bestimmt wird, d.h. Unternehmen setzen basierend auf ihrer Kostensituation und der konkurrierenden Importpreise ihre Absatzpreise, wodurch eine Reaktion in der Nachfrage ausgelöst wird, die infolge der Höhe der Kaufentscheidung wiederum die Produktionsmenge bestimmt. Der technologische Wandel wird in PANTA RHEI durch die Produktionsweise, die Arbeitsproduktivität und die Kapitalintensität abgebildet. Aktuelle technologische Entwicklungen, die noch keine ausreichende zeitliche Fundierung haben, werden zusätzlich integriert.

Daneben beruht PANTA RHEI auf zwei wesentlichen Grundlagen: Der bottom-up Struktur sowie der vollständigen Integration. Erstere bezeichnet die Modellierung jedes einzelnen Wirtschaftsbereiches und die Berechnung makroökonomischer Variablen durch

explizite Aggregation. Jeder Sektor ist in den wirtschaftlichen Kontext eingebettet und industrielle Verflechtungen werden explizit integriert und genutzt, um wirtschaftliche Interaktionen zu erklären. Letztere beschreibt den komplexen und simultanen Lösungsprozess des Modells, der interindustrielle Abhängigkeiten, Einkommensverteilung und staatliche Umverteilungseffekte ebenso wie die Einkommensverwendung berücksichtigt. Das Modell kombiniert endogene Schätzungen auf Basis von Zeitreihendaten mit exogenen Vorgaben und ist nicht durch die Randbedingung einer Nutzenoptimierung oder eines Gleichgewichts eingeschränkt. Eine Übersicht über die Modellstruktur bietet Abbildung 2. Eine ausführlichere technische Beschreibung findet sich in Becker et al. (2022).

Abbildung 2: Aufbau und Struktur des Modells INFORGE / PANTA RHEI im Überblick



Quelle: Becker et al. (2022, S. 4)

PANTA RHEI wurde in der Vergangenheit vielfältig eingesetzt, neben Arbeiten für das BMWi (Lehr et al. 2015) und UBA (Lehr et al. 2019) u. a. in den Energieszenarien 2010 und 2011 (Prognos et al. 2010, 2011), der Energierferenzprognose 2014 (Prognos et al. 2014), zur Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Energiewende für den ersten und zweiten Fortschrittsbericht zum Monitoring der Energiewende (GWS et al. 2014; Lutz et al. 2018) sowie für die vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel (Lehr et al. 2020).

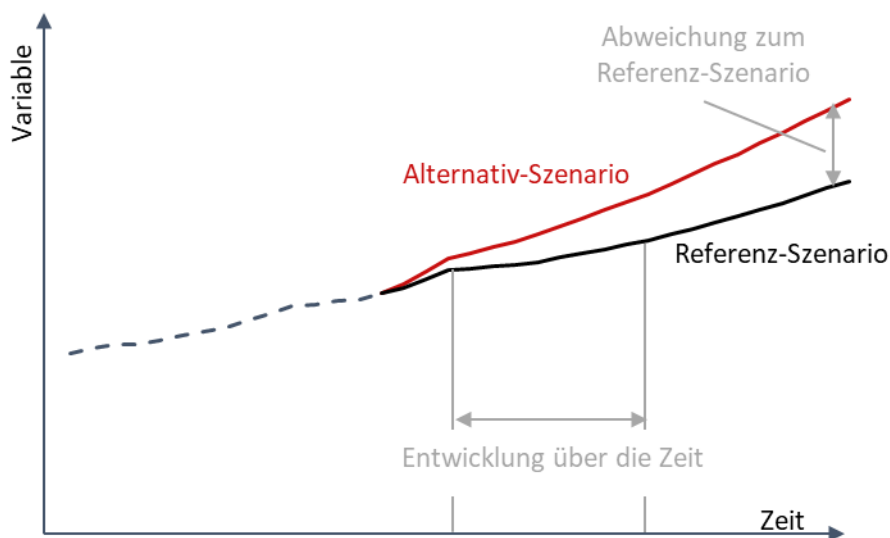
2.2.2 SZENARIOANALYSE

Gesamtwirtschaftliche Modelle werden häufig zusammen mit einer Szenarioanalyse angewendet. Die Szenarioanalyse ist eine Methode zum Umgang mit den verschiedenen Arten von Ungewissheiten in der Zukunft. Es können verschiedene Annahmen darüber, wie sich die Zukunft entwickeln könnte, getestet werden. Szenarien zeigen mögliche

Entwicklungspfade auf, welche die Reaktionen auf die für das jeweilige Szenario getroffenen Annahmen widerspiegeln.

Die Szenarioanalyse hilft bei der Analyse und Quantifizierung der Auswirkungen von "Was-wäre-wenn"-Fragen, z. B. "Was" wird mit der Wirtschaft passieren, "wenn" ein extremes Wetterereignis eintritt oder bestimmte Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden? Ein Szenario ist ein in sich konsistentes Bündel von quantifizierten Annahmen, die die zukünftige Entwicklung beschreiben. "Wenn" beschreibt dabei die Annahmen in den Szenario-Einstellungen, die in das Modell als Input eingespeist werden. "Was" umfasst die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen und Folgen, die sich aus den getroffenen Annahmen ergeben. Ein Szenario hilft also dabei, besser zu verstehen, was passieren könnte und wer oder was wie betroffen sein würde. Mit Hilfe dieser Analysen kann somit vor einer konkreten Umsetzung von politischen Instrumenten oder Maßnahmen analysiert werden, welche Reaktionen in der Wirtschaft zu erwarten sind. Die Szenarioanalyse kann dabei helfen, die Umsetzung derart zu gestalten, dass die negativen Effekte für die Wirtschaft möglichst niedrig ausfallen bzw. die positiven Effekte deutlich positiv sind. Ein Vergleich zwischen einem Szenario mit den zusätzlichen Annahmen zu einem Basis- oder Referenzszenario gibt Aufschluss über die jeweiligen ökonomischen Wirkungen der getroffenen Szenario-Annahmen (vgl. Abbildung 3).

Abbildung 3: Referenzszenario, Alternativszenario und Abweichungen



Quelle: Großmann et al. (2022)

Die Projektionen für die Zukunft fußen üblicherweise auf der Analyse der Vergangenheit. Mittels eines breiten Datensatzes aus der amtlichen Statistik (z. B. Statistisches Bundesamt, Bundesagentur für Arbeit) zu unterschiedlichsten Themen wie Einkommen, Konsumstruktur, Staatsausgaben, Wirtschaftsstruktur, CO₂-Emissionen, Fläche, Erwerbsneigung etc. werden unter Einsatz stochastischer Methoden Verhaltensmuster, ihre Veränderungen und die Determinanten dieser Veränderungen analysiert und entlang gesamtwirtschaftlicher Buchungssysteme wie der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen zusammengefügt (Helmrich et al. 2022). Neben dem eindeutig messbaren enthalten die Projektionen auch bereits beschlossene Gesetze sowie Informationen zu

unvermeidlichen Umständen, die sich am aktuellen Rand bereits erkennen lassen. Dazu zählt auch der heute bereits nicht mehr verhinderbare Klimawandel.

2.2.3 GRENZEN ÖKONOMISCHER MODELLANALYSEN

Komplexe gesamtwirtschaftliche Modelle kommen immer dann zum Einsatz, wenn die ökonomischen Wirkungen von umweltpolitischen Instrumenten, Maßnahmen und Entwicklungen abgeschätzt werden sollen. Die eingesetzten Modelle bieten die Möglichkeit, die vielfältigen Anpassungsreaktionen innerhalb der Volkswirtschaft (z.B. Preisreaktionen, Investitionsimpulse) vollständig und in ihrer Gesamtheit abzubilden. Gesamtwirtschaftliche Modelle bilden die ökonomischen Zusammenhänge der Realität grundsätzlich nur in vereinfachter Form ab. Je nach Modelltyp kommen unterschiedliche Datensätze, ökonomische Theorien und Annahmen zum Einsatz und es muss an verschiedenen Stellen von der Realität abstrahiert werden. Insgesamt müssen die mit diesen vereinfachten ökonomischen Rechen- und Analysesystemen berechneten gesamtwirtschaftlichen und sektoralen Effekte aus verschiedenen Gründen mit Vorsicht interpretiert und genutzt werden.

Neben der Abbildung der Ökonomie in einem Modell braucht es für die Analyse der klimawandelbedingten volkswirtschaftlichen Folgekosten zusätzlich Informationen und Daten zur Entwicklung des Klimas sowie in einem weiteren Schritt zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Diese Inhalte und Informationen müssen in geeigneter Form mit der Ökonomie verknüpft werden, und bedingen sich teilweise gegenseitig.

Als erstes braucht es für die Analyse der klimawandelbedingten volkswirtschaftlichen Folgekosten einen ökonomischen Modellrahmen, der die ökonomischen Projektionen für die Zukunft bereitstellt. Je weiter der Zeithorizont des Modells in der Zukunft liegt, desto unsicherer ist der Aussagegehalt der Ergebnisse. Zwar werden bereits heute erkennbare Trends für die Ökonomie (z.B. Industrie 4.0, Digitalisierung) bei den Projektionen berücksichtigt. Jedoch können über einen Zeitraum von fast 30 Jahren bis zum Jahr 2050 bzw. sogar bis zum Jahr 2100 immer wieder unvorhersehbare Ereignisse und Entwicklungen eintreten. Der gerade im Februar 2022 begonnene Krieg von Russland mit der Ukraine sowie auch die Lockdowns in China während der Pandemie zeigen sehr deutlich und eindringlich, welche ökonomische Wucht solche unvorhersehbaren und nicht planbaren Ereignisse mit sich bringen können: die Öl- und Gaspreise sind binnen kürzester Zeit deutlich angestiegen, Lieferabhängigkeiten und -verpflichtungen sind plötzlich unterbrochen. Je nach Entwicklung können sich daraus noch weitere und länger andauernde folgenschwere ökonomische Wirkungen entwickeln.

Die Datenbasis für den ökonomischen Modellrahmen der makro-ökonomischen Modelle (IOT-Modelle und CGE-Modelle) bilden Input-Output-Tabellen sowie Informationen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. Der Einsatz eines solchen Modellrahmens ermöglicht es daher nur, die tatsächlich handelbaren und monetarisierbaren Güter und Dienstleistungen in einer konsistenten Weise abzubilden (Bubeck et al. 2020). Gerade der Klimawandel bringt jedoch eine Reihe von Effekten und Wirkungen mit sich, die sich eben nicht unmittelbar monetarisieren bzw. mit einem ökonomischen Modell bewerten lassen: Verlust an Artenvielfalt, Verschlechterung der Lebensqualität, Verlust von

Kulturgütern, um nur einige wenige zu nennen. Dementsprechend stellen die berechneten Ergebnisse für die volkswirtschaftlichen Folgekosten zunächst nur eine untere Grenze der möglichen Schäden dar.

Der makroökonomische Modellrahmen schreibt das Verhalten der Ökonomie aus der Vergangenheit in die Zukunft fort. Daraus ergibt sich typischerweise eine gewisse Linearität in der Größenordnung der Impulse (Bubeck et al. 2020). Während dies für die Abbildung von langfristigen Wirkungen wie dem graduellen Temperaturwandel durchaus zuträglich ist, ergeben sich insbesondere Probleme bei der Implementierung von schockartigen Extremereignissen. Die Struktur des Modells sorgt dafür, dass die Volkswirtschaft sich nach solchen Extremereignisse wieder in Richtung des ursprünglichen Wachstums- bzw. Entwicklungspfads bewegt.

Ein weiterer entscheidender Punkt für die Möglichkeiten zur Abbildung von Effekten des Klimawandels und der Anpassung in einem ökonomischen Modell ist die regionale Auflösung des verwendeten Modellrahmens. Während einige Effekte des Klimawandels und insbesondere auch der Anpassung an den Klimawandel einen regionalen Bezug und regionales Wirken mit sich bringen, z.B. Deichbau in Küstenregionen, entfalten andere Effekte und Maßnahmen ihre Wirkungen auf nationaler Ebene, z.B. branchenspezifische Preisänderungen. Der Klimawandel ist jedoch auch zusätzlich ein globales Problem, so dass der Klimawandel auch weltweit zu Schäden führt, welche sich über internationale Handelsbeziehungen im jeweils betrachteten Land auswirken (Bubeck et al. 2020). Für eine vollständige Berücksichtigung dieser Wirkungskanäle wäre es erforderlich, eine vollständige internationale Handelsmodellierung mit weltweit zu erwartenden Klimaentwicklungen zu koppeln, um so die Auswirkungen auf das betrachtete Land abschätzen zu können. Trotzdem können die internationalen Folgen des globalen Klimawandels in nationale Effekte übersetzt werden und so zumindest vereinfacht abgebildet werden. Peter et al. (2021) analysieren die transnationalen Einflüsse des Klimawandels z.B. für die deutsche Volkswirtschaft.

2.3 KLIMAPROJEKTIONEN, EXTREMWETTEREREIGNISSE UND SCHADENSKATEGORIEN

Die regelmäßig erscheinenden Monitoringberichte der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel geben einen Überblick über die Klimaentwicklung und die beobachteten Folgen des Klimawandels in Deutschland sowie bereits ergriffener Anpassungsmaßnahmen (UBA 2015, 2019). Um die zukünftigen Wirkungen des Klimawandels abschätzen zu können, werden Daten zur zukünftigen Entwicklung des Klimas in Deutschland benötigt. Eine Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen ergeben sich aus den Szenarien-basierten Klimaprojektionen.

Globale Klimamodelle sind hochkomplexe Rechenmodelle, welche die wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre abbilden und dadurch Vorgänge und Zusammenhänge des Klimas verständlicher und nachvollziehbarer machen (Brosseur et al. 2017; DWD 2022c). Klimaprojektionen liefern auf Basis von Annahmen (Szenarien) Einschätzungen zur Entwicklung des Klimas in weiter Zukunft (mehr als 100 Jahre). Der Modellrahmen wird trotz zahlreicher unterschiedlicher, auch länderspezifischer Klimamodelle durch das World Climate Research Programme

(WCRP) vorgegeben und liefert auch die Basis der Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Aus den Rechenergebnissen dieser Klimamodelle lassen sich u.a. Tendenzen zur Entwicklung von Extremwetterereignissen ableiten. Das hier verwendete Modell ist kein IAM und wird nicht direkt mit den physischen Ergebnissen aus den Klimamodellen verknüpft (vgl. Ergebnisbericht zu AP 3.1 dieses Projektes: Stöver et al. 2022). Vielmehr werden aus den zukünftig zu erwartenden Extremwetterereignissen Narrative zu den wirtschaftlichen Konsequenzen entwickelt und daraus Szenario-Größen abgeleitet, wodurch die Auswirkung des Klimawandels auf wirtschaftliche und sozioökonomische Größen abgeschätzt werden kann.

Die Extremwetterereignisse, die sich mit dem Klimawandel in Deutschland in Verbindung bringen lassen, sind:

- Starkregen und Hochwasser
- Hitzewellen
- Dürre

Eine genaue Einordnung und Definition der Extremwetterereignisse sowie ihr Zusammenhang mit dem Klimawandel findet sich in dem Bericht „Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland“, der im Rahmen dieses Vorhabens entstanden ist (Trenczek et al. 2022b, S. 14–17). Das Eintreten solcher Ereignisse wird danach durch den Klimawandel wahrscheinlicher und intensiver, wie auch schon die in jüngster Vergangenheit aufgetretenen Extremwetterereignisse zeigen. Nach Lange et al. (2020) wird bei einer globalen Erwärmung von 2 Grad die Fläche, welche jährlich Extremwetterereignissen ausgesetzt ist, weltweit um mehr als das fünffache zunehmen. Diese Zunahme wird vor allem von Dürren und Hitzewellen getrieben, aber auch andere Extremwetterereignisse wie Überschwemmungen, Feuer oder Zyklone tragen dazu bei. Auch in IPCC (2021, S. 9) wird festgestellt, dass die Häufigkeit von global auftretenden Hitzewellen und Dürren sehr wahrscheinlich („high confidence“) zunimmt und mit mittlerer Sicherheit („medium confidence“) die Zahl der Feuerwetter („fire weather“) in einigen Regionen aller bewohnten Kontinente sowie der Überschwemmungen an einigen Orten steigt.

Auf Basis der vorliegenden Klimaprojektionen ist in Deutschland ein weiterer Anstieg der mittleren Lufttemperatur zu erwarten, vor allem das Auftreten von extrem hohen Lufttemperaturen und die **Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen** werden voraussichtlich deutlich zunehmen (Brienen et al. 2020). Für Hitzewellen lässt sich bereits eine eindeutige klimawandelbedingte Steigerung der Eintrittswahrscheinlichkeit feststellen, die Hitzewellen in den Jahren 2018, 2019 und 2020 verdeutlichen diese Steigerung eindrucksvoll (DWD 2021).

Bei der zukünftigen Entwicklung von **Dürren und Niedrigwasser** wird erwartet, dass sich bestehende Trends zu Niedrigwasserereignissen wahrscheinlich **verstärken** werden. Flussabschnitte, an welchen im Sommer und Herbst bereits Niedrigwasserereignisse auftreten, werden vor allem zum Ende des Jahrhunderts intensivere Niedrigwasserereignisse erleben (Brienen et al. 2020).

Die durchschnittlichen Niederschlagsmengen werden voraussichtlich leicht zunehmen, vor allem im Winter und im Frühjahr wird mit deutlicheren Zunahmen gerechnet,

während im Sommer ein Rückgang der Niederschlagssummen erwartet wird (Brienen et al. 2020). In Bezug auf **Starkregen** wird eine deutliche **Zunahme der Häufigkeit** als auch der **Intensität** erwartet (Brienen et al. 2020). Die bei Starkregen auftretenden lokalen kräftigen Niederschläge können dazu führen, dass der Boden die Wassermassen nicht mehr aufnehmen kann. Es kommt zu **Überschwemmungen** durch Starkregen und Sturzfluten und zu rasant steigenden Pegelständen bei Flüssen und Bächen.

Die beschriebenen Klimaprojektionen für Deutschland lassen erahnen, dass es in Zukunft zu einer steigenden Anzahl von Extremwetterereignissen in Deutschland kommen kann, mit einer jeweils weiter zunehmenden Intensität der Schäden. Dies ist umso mehr der Fall, wenn Anpassungsmaßnahmen ausbleiben.

Die genannten Extremwettertypen sorgen jeweils für ein unterschiedliches Schadensbild. Hirschfeld et al. (2021b) haben im Rahmen dieses Vorhabens eine Kategorisierung der Kosten des Klimawandels vorgenommen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über diese Kategorisierung von Klimafolgekosten sowie möglicher Schadensdimensionen.

Tabelle 1: Kategorien von Klimafolgekosten und Dimensionen möglicher Schäden

	materiell	immateriell
direkt	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstörte Gebäude und Infrastrukturen • Produktionseinbußen wegen Ausfall von Arbeitnehmenden • Ernteauffälle in der Landwirtschaft • Ertragseinbußen in der Forstwirtschaft • Gesundheitskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Tote • Gesundheitliche Beeinträchtigungen • Beeinträchtigungen des Wohlbefindens • Verlust der heimischen Artenvielfalt • Beeinträchtigung von Ökosystemen
indirekt	<ul style="list-style-type: none"> • Produktionseinbußen wegen Problemen bei Zulieferern • Absatzeinbußen wegen Nachfragerückgang 	<ul style="list-style-type: none"> • Verlust globaler Artenvielfalt • Beeinträchtigung des Landschaftsbilds • Psychische Belastung durch Verlust oder Belastung von Angehörigen • Politische Instabilität

Quelle: Hirschfeld et al. (2021b)

Direkte materielle Kosten des Klimawandels ergeben sich beispielsweise durch klimawandelbedingte Überschwemmungsschäden an Gebäuden oder Ernte- und Ertragseinbußen in der Land- und Forstwirtschaft durch Dürre oder Sturm. Zu diesen direkten Kosten kommen die indirekten materiellen Kosten hinzu. Diese resultieren beispielsweise aus Gesundheitskosten und Produktivitätsverlusten aufgrund von Hitzeereignissen und betrieblichen Verlusten durch die Unterbrechung von Zulieferketten o.ä. Während sich die genannten Kategorien jeweils monetär bewerten lassen, kommen als weitere Kostenkategorien noch die direkten und indirekten nicht-materiellen Kosten zu den Gesamtkosten hinzu. Direkte nicht-materielle Kosten entstehen nach Hirschfeld et al. (2021b) beispielsweise durch Todesfälle und Verschlechterung der Gesundheit und Lebensqualität, Verringerung der Artenvielfalt in Deutschland oder Beeinträchtigungen des Stadt- und Landschaftsbildes. Die indirekten nicht-materiellen Kosten enthalten beispielsweise den Verlust von Biodiversität und Landschaften in anderen Ländern und Weltregionen. Versuche der monetären Bewertung (des Verlusts) von Ökosystemleistungen, die u. a. im TEEB-Projekt für Deutschland vorgenommen wurden, haben selbst für diesen Teilbereich der immateriellen Schäden nicht zur Übereinstimmung über nutzbare

Schadensgrößen geführt (Hartje et al. 2015).

Die in dieser Studie vorgenommene modelltheoretische Bewertung der volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels kann sich nur auf die tatsächlich monetär bewertbaren Kostendimensionen konzentrieren.

2.4 AUSWAHL VON KLIMAWANDELBEDINGTEN WIRKUNGEN

Für die modellgestützte Abschätzung von volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland ist es erforderlich, die mit dem Klimawandel verbundenen Wirkungen und Risiken für Deutschland sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren. Die klimawandelbedingten Schäden sind vielfältig und unterscheiden sich in Ausmaß und Höhe. Vor dem Hintergrund der Abbildung der klimawandelbedingten Schäden in einem ökonomischen Modell müssen diese daher entsprechend gefiltert und priorisiert werden. Die Berücksichtigung aller erdenklichen klimawandelbedingten Wirkungen und Schäden ist aufgrund der schier unendlichen Anzahl an möglichen (ökonomischen) Wirkkanälen, der hohen Unsicherheiten bezüglich der möglichen Änderungen des Klimas (s. Abschnitt 2.3) sowie der notwendigen Quantifizierung der einzelnen Klimawirkungen nicht vollumfänglich möglich, da diese teilweise auch heute unbekannt oder nicht ausreichend erforscht sind.

Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) 2021 liefert eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassungsstrategie in Deutschland. Sie analysiert sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels für Deutschland als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren. Gemäß KWRA 2021 wird der Begriff Klimarisiko wie folgt abgegrenzt (Kahlenborn et al. 2021a, S. 44): „Ein Klimarisiko bezeichnet 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 Rahmen der KWRA 2021 wurden 13 übergeordnete Handlungsfelder, welche den fünf Clustern „Land“, „Wasser“, „Infrastruktur“, „Wirtschaft“ und „Gesundheit“ zugeordnet werden, sowie 102 einzelne Klimawirkungen im Hinblick auf die Höhe des Klimarisikos für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts und das Ende des Jahrhunderts bewertet. Für die 29 größten Klimarisiken wurden Anpassungsmöglichkeiten identifiziert und für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts bewertet, wie sich die Anpassungsmöglichkeiten jeweils auf die Klimarisiken auswirken können. Durch die Bewertung ist es möglich, die Handlungsfelder mit den höchsten Risiken zu identifizieren, die jeweiligen Anpassungsmöglichkeiten zu bewerten und so die größten Handlungserfordernisse zu identifizieren (Kahlenborn et al. 2021b).

Die in der KWRA 2021 den einzelnen Handlungsfeldern zugeordneten Klimawirkungen bilden die Grundlage für die Analyse in dieser Studie. Eine Auflistung aller 102 Klimawirkungen nach Handlungsfeldern findet sich in Tabelle 12 im Anhang. Um dem Kern dieser Analyse dienlich zu sein, erfolgt die Auswahl einzelner Klimawirkungen insbesondere im Hinblick auf die Höhe des **Klimarisikos**, die volkswirtschaftliche **Relevanz** sowie die mögliche **Quantifizierbarkeit** und Abbildbarkeit der Klimawirkungen in einem makroökonomischen Modell.

Abbildung 4 stellt den Filterprozess zur Auswahl der Klimawirkungen grafisch dar, im

Folgenden werden die einzelnen Schritte schriftlich erläutert.

Abbildung 4: Filterprozess zur Auswahl der Klimawirkungen



Quelle: eigene Darstellung

1. Entwicklung des klimawandelbedingten Risikos

Eine erste Auswahl der einzelnen zu untersuchenden Klimawirkungen kann anhand der in der Zukunft zu erwartenden klimawandelbedingten Risiken vorgenommen werden. Die KWRA 2021 erfasst für die 102 Klimawirkungen (100 Risiken, 2 Chancen) jeweils die Klimarisiken mit und ohne Anpassung. Die Bewertung des Risikos wurde aufgrund des jeweiligen Forschungsstands zu den einzelnen Klimawirkungen sowie komplexer Wechselwirkungen und Wirkpfade nur in den drei Abstufungen „schwach“, „mittel“ und „stark“ vorgenommen (Kahlenborn et al. 2021c). Zeitlich wird die Bewertung jeweils für die Gegenwart, für die Mitte des Jahrhunderts sowie für das Ende des Jahrhunderts vorgenommen. Des Weiteren erfolgt eine Unterscheidung zwischen einer optimistischen Entwicklung und einer pessimistischen Entwicklung des Klimas in der Zukunft.

Für die Filterung der Klimawirkungen für diese Analyse werden in einem ersten Schritt insbesondere die Klimawirkungen ausgewählt, die bereits zur **Mitte des Jahrhunderts** im **pessimistischen Fall** ein **starkes Klimarisiko** aufweisen. Dies ist für insgesamt 37 Klimawirkungen der KWRA 2021 der Fall. Für diese 37 Klimawirkungen wird auch für das Ende des Jahrhunderts ein starkes Klimarisiko ausgewiesen. Zum Ende des Jahrhunderts wären es insgesamt 53 Klimawirkungen, die mit einem starken Klimarisiko einhergehen. Aus Gründen des Grades der Gewissheit sowie der Quantifizierbarkeit (siehe

nächste Filter-Schritte) liegt der Fokus für die Filterung hier jedoch auf der Mitte des Jahrhunderts.

Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass auch die durch diesen Filter-Schritt wegfallenden Klimawirkungen zu volkswirtschaftlichen Kosten und Schäden führen werden. Die Klimawirkungen mit starkem Klimarisiko verursachen nicht zwangsläufig auch die höchsten volkswirtschaftlichen Kosten und Schäden. Die Bewertung des Klimarisikos zeigt lediglich auf, welche gesellschaftlichen und ökologischen Folgen sich aus einer geminderten Funktionsfähigkeit eines betrachteten Systems ergeben könnten (Kahlenborn et al. 2021c).

2. Vorgelagerte Klimawirkungen

Vorgelagerte Klimawirkungen werden direkt von klimatischen Einflüssen ausgelöst und stellen zunächst nur physische Effekte dar (z. B. Sickerwasser, Vernässung, Seegang, Niedrigwasser, Hochwasser). Bei der Betrachtung von Wirkungsketten für einzelne Klimawirkungen können diese vorgelagerten Klimawirkungen auch eine Rolle spielen (z. B. Hochwasser als vorgelagerte Wirkung für Schäden an Infrastruktur, vgl. (Kahlenborn et al. 2021b). Die vorgelagerten Klimawirkungen verursachen somit isoliert betrachtet keine unmittelbar quantifizierbaren Kosten oder Schäden, sondern entfalten ihre Wirkung erst im weiteren Verlauf der Wirkungskette auf nachgelagerter Ebene. Dementsprechend werden die vorgelagerten Klimawirkungen nicht einzeln für diese Analyse betrachtet. Die zuvor ermittelte Liste mit 37 Klimawirkungen verkürzt sich so auf 32.

3. Grad der Gewissheit

Die Analyse der zukünftigen klimawandelbedingten volkswirtschaftlichen Folgekosten ist an vielen Stellen mit Unsicherheiten verbunden. So kann die Entwicklung des Klimas nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden und auch die Wirkung des Klimas in den einzelnen Handlungsfeldern kann nur unter Unsicherheit bewertet werden. Die einzelnen Klimarisiken weisen daher auch jeweils einen unterschiedlichen Grad der Gewissheit für die Bewertung auf. Während manche Klimarisiken der Zukunft gut erforscht sind und somit das Risiko gut bewertet werden kann, befinden sich andere Klimawirkungen und -risiken noch in einem Anfangsstadium der Forschung oder können schlicht aufgrund hoher zu erwartender Unsicherheiten nicht mit ausreichender Gewissheit bewertet werden. Je weiter man in die Zukunft schaut, desto unsicherer wird die Möglichkeit einer Bewertung des Risikos und desto geringer ist der Grad der Gewissheit. Während es im pessimistischen Fall zur Mitte des Jahrhunderts mit 66 Klimawirkungen noch mehr als zwei Drittel der Klimawirkungen sind, für die der Grad der Gewissheit als „hoch“ (11 Klimawirkungen) oder „mittel“ (55 Klimawirkungen) eingestuft werden kann, so sind es zum Ende des Jahrhunderts nur noch 26 Klimawirkungen. Für 74 Klimawirkungen ist der Grad der Gewissheit für die Bewertung des Risikos zum Ende des Jahrhunderts nur „gering“ (67 Klimawirkungen) bzw. „sehr gering“ (7 Klimawirkungen). Da bereits die qualitative Bewertung des Klimarisikos schwerfällt und mit hohen Unsicherheiten verbunden ist, wird auf eine Quantifizierung der Klimawirkungen für die Analyse verzichtet.

Die bereits mit den Filter-Schritten 1 und 2 gekürzte Liste an zukünftigen Klimawirkungen mit starken Klimarisiken kann daher um diejenigen Klimawirkungen gekürzt werden, die jeweils einen geringen oder einen sehr geringen Grad der Gewissheit der Bewertung für

die Mitte des Jahrhunderts aufweisen. Die Liste der zu betrachtenden Klimawirkungen verkürzt sich somit von 32 auf 25 Klimawirkungen.

Auch hier gilt für die herausgefilterten Klimawirkungen, dass diese in Zukunft durchaus hohe volkswirtschaftliche Kosten und Schäden verursachen können. Die Quantifizierbarkeit kann jedoch im Rahmen dieser Analyse nicht geleistet werden, sondern erfordert jeweils weiterführende Forschungsarbeiten zur besseren Risikoabschätzung und schließlich der Quantifizierung der einzelnen Klimawirkungen.

4. *Abbildbarkeit in einem makroökonomischen Modell*

Nicht alle aus den zuvor durchgeführten Filter-Schritten gewonnenen Handlungsfelder und Klimawirkungen eignen sich tatsächlich für eine Abbildung in einem makroökonomischen Modell. Das für die Analyse in dieser Studie verwendete nationale makroökonomische Modell PANTA RHEI bildet die Struktur der deutschen Wirtschaft über die Informationen der Input-Output-Verflechtung, die volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen sowie wichtige Bestandsgrößen auf Bundesebene ab. Eine Implementierung der zuvor identifizierten Klimarisiken macht es erforderlich, dass eine Übersetzung der jeweiligen Wirkungen in ökonomische Größen (Mengen, Preise, Beschäftigte) bzw. Branchen erfolgen muss. Für diese Übersetzung werden Daten und Informationen aus Literatur, Datenbanken und anderen Studien verwendet (vgl. Kapitel 3.1). Für einige der Klimarisiken ist eine Quantifizierung und damit Übersetzung in das Modell als Klima-Impuls nicht möglich: bspw. ist die Klimawirkung „Abiotischer Stress für Pflanzen“ in Zukunft relevant, die ökonomischen Folgen sind jedoch nur sehr schwer zu bewerten bzw. zu quantifizieren. Zudem führt der abiotische Stress am Ende einer möglichen Wirkungskette zu Ernteeinbußen bzw. Qualitätsminderungen der Ernte. Die monetär bewertete Produktionsleistung des Sektors Landwirtschaft ist wiederum eine Größe, welche im makroökonomischen Modell enthalten und somit durch die Wirkungen des Klimawandels beeinflusst werden kann.

Dieser Schritt der Filterung führt dementsprechend dazu, dass die nicht unmittelbar abbildbaren Klimawirkungen zwar nicht mehr unmittelbar einzeln betrachtet werden, durch die zu erwartenden ökonomischen Effekte jedoch häufig noch in zu betrachtenden und abbildbaren Klimawirkungen mitgedacht und berücksichtigt werden.

Auch immaterielle bzw. nicht-monetäre Kostenkategorien können in einem ökonomischen Modell nicht unmittelbar berücksichtigt werden. Für nicht-monetäre Schäden gibt es keinen marktbasieren Ansatz der Kostenermittlung, da für die Ermittlung keine eindeutige anerkannte Bewertungsmethode vorhanden ist. Eine reine Betrachtung der anfallenden Kosten zum Wiederaufbau von z. B. Kulturstätten würde an dieser Stelle deutlich zu kurz greifen. Auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensqualität (z. B. Verlust von Artenvielfalt durch das Aussterben von Tier- und Pflanzenarten) können nicht unmittelbar monetär bewertet werden bzw. durch ein ökonomisches Modell berechnet werden. Auch die ex-ante Analyse von (Trenczek et al. 2022c) konzentriert sich auf die Berechnung und Quantifizierung der monetären Schäden.

Dieser Filter-Schritt reduziert die Liste der zu untersuchenden Klimawirkungen zunächst auf vier. Das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ kann insgesamt nicht betrachtet werden, da die dort verorteten Klimawirkungen nur schwer oder gar nicht für die

gesamtwirtschaftliche Analyse quantifiziert werden können. Das Handlungsfeld Boden wird beim Ertrag der Landwirtschaft mitdiskutiert. Die Klimawirkungen im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft spiegeln sich ebenfalls im Holzertrag wider. Die durch den Filterprozess erhalten gebliebenen Klimawirkungen in den Handlungsfeldern Fischerei (Entkoppelungen der Nahrungsbeziehungen in der Ostsee; Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern), Küsten- und Meeresschutz (Wasserqualität und Grundwasserver-salzung; Naturräumliche Veränderungen an Küsten; Überlastung der Entwässerungs-einrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten) sowie Wasserhaushalt, Wasserwirt-schaft (Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität) müs-sen in diesem Schritt ebenfalls herausgefiltert werden, da die ökonomischen Folgen nur unzureichend quantifiziert werden können. Andere Klimawirkungen können wiederum zusammen betrachtet werden (Stadtklima/Wärmeinseln und Innenraumklima haben je-weils Auswirkungen auf Gesundheit und Produktivität). Auch die durch die Filterung er-halten gebliebenen Klimawirkungen im Handlungsfeld Menschliche Gesundheit (Hitze-belastung; Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft; UV-be-dingte Gesundheitsschädigung) können nicht isoliert analysiert werden.

Die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ ist in der dem Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur zugeordnet, die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ dem Handlungsfeld Industrie und Gewerbe. Hinsichtlich Beeinträchtigungen des Warenverkehrs über Was-serstraßen im Inland sind insbesondere Niedrigwasserereignisse von Bedeutung, da Niedrigwasserereignisse im Vergleich zu Hochwasserereignissen oftmals deutlich län-gerer und auch räumlich ausgedehnter auftreten (Nilson et al. 2020). Im Rahmen dieser Analyse werden die Klimawirkungen „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Was-serstraßen (Inland)“ und „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ zusammen betrachtet.

5. Erweiterung der Liste um volkswirtschaftlich relevante Klimawirkungen

Nach dem Filter-Prozess können weitere Klimawirkungen der Liste hinzugefügt werden, welche von besonders hohem Interesse sind oder welche hohe volkswirtschaftlich rele-vante Effekte vermuten lassen. Die Ausführungen in Trenczek et al. (2022b) verdeutli-chen, in welchen Handlungsfeldern bereits in der Vergangenheit hohe bzw. nennens-werte Schäden angefallen sind, die sich auch quantifizieren lassen. Zu nennen sind ins-besondere Ertragsverluste in der Land- und Forstwirtschaft sowie Schäden an Gebäu-den und Infrastruktur. Der Liste werden somit die Klimawirkungen Ertragsausfälle in der Landwirtschaft, Beschädigung oder Zerstörung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste, Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen, Beeinträchtigung der Versor-gung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international) sowie Auswirkungen auf das Gesundheitssystem zur weiteren Analyse hinzugefügt:

Die auf Basis des Filterprozesses für die weitere Analyse ausgewählten Klimarisiken und deren jeweiligen Handlungsfelder sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Auswahl der Klimawirkungen für die weitere Analyse

Handlungsfeld	Klimawirkung
Landwirtschaft	Ertragsausfälle
Wald- und Forstwirtschaft	Nutzfunktion: Holzertrag
Küsten- und Meeresschutz	Beschädigung oder Zerstörung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste
Bauwesen	Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen
Bauwesen	Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser
Verkehrsinfrastruktur / Industrie und Gewerbe	Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Niedrigwasser) / Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)
Industrie und Gewerbe	Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)
Menschliche Gesundheit	Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis der KWRA 2021

3 MODELLBASIERTE EX-ANTE UNTERSUCHUNG DER VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN FOLGEKOSTEN DES KLIMAWANDELS IN DEUTSCHLAND: SCHADENSKOSTEN

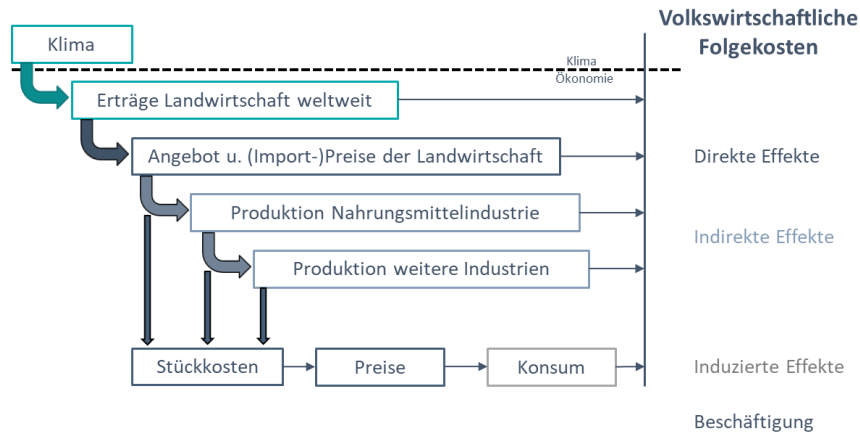
Die Darstellung der Methodik sowie die Auswahl der Klimawirkungen, die in dieser Studie zur Bestimmung der volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels näher betrachtet werden, findet sich in Kapitel 2. Während die Klimawirkungs- und Risikoanalyse eine detaillierte qualitative Einschätzung zur Entwicklung des klimabedingten Risikos abgibt, geht die Analyse hier noch einen Schritt weiter und unternimmt eine Quantifizierung der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen für ausgewählte klimawandelbedingte Risiken (Kapitel 3.1). Auf Basis der quantifizierten Wirkungen erfolgt in Kapitel 3.2 die modellbasierte Abschätzung der volkswirtschaftlichen Folgekosten. Dabei werden sowohl die gesamtwirtschaftlichen Effekte der jeweiligen Klimawirkungen einzeln als auch integriert betrachtet. Die Gesamtbetrachtung umfasst dabei nicht nur die Auswirkungen auf Bruttoinlandsprodukt und Beschäftigung sowie einzelne Wirtschaftszweige, sondern auch auf die UN-Nachhaltigkeitsziele und Ungleichheit.

3.1 QUANTIFIZIERUNG DER AUSGEWÄHLTEN WIRKUNGEN UND RISIKEN

Die (bio)physikalischen Schäden des Klimawandels müssen für die verschiedenen Wirkungsketten zunächst in ökonomische Wirkungen übersetzt werden. Klimawandelbedingte Schäden sowie Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel haben jeweils unterschiedliche ökonomische Auswirkungen. In monetarisierter Form stellen diese Klimawirkungen die direkten Kosten des Klimawandels dar (Bubeck et al. 2020). Diese direkten ökonomischen Wirkungen werden schließlich als Input für die Abschätzung der volkswirtschaftlichen Folgekosten verwendet. In einem ökonomischen Modell werden durch diese direkten Wirkungen weitere indirekte und induzierte Wirkungen ausgelöst. Erst die Summe aus den direkten, indirekten und induzierten Effekten stellen die insgesamt anfallenden volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels dar. Abbildung 5 veranschaulicht diesen Zusammenhang am Beispiel sinkender Erträge in der Landwirtschaft. International und national rückläufige Erträge ausgelöst durch z.B. eine klimawandelbedingte globale Dürre führen zu Steigerungen der Importpreise und heimischen Preise für landwirtschaftliche Produkte. Diese durch den Klimawandel ausgelöste Preissteigerung wird als Input für die Szenario-Rechnung verwendet und stellt den direkten Effekt dar. Nachgelagerte Branchen, welche landwirtschaftliche Produkte als Input für ihre Produktion beziehen, werden mit diesen Preissteigerungen konfrontiert und reagieren mit Anpassungen in ihrem Produktionsprozess (Weitergabe der Preissteigerungen, Substitution hin zu anderen Vorprodukten, Verringerung des Outputs, Technologieänderungen zur effizienteren Verwendung des Inputs o.Ä.). Die daraus entstehenden Folgen für die Volkswirtschaft stellen die indirekten Effekte dar. Die direkten und indirekten Effekte zusammen bewirken, dass sich die Einkommen der Haushalte, die Steuereinnahmen des Staates und das Investitionsbudget der Unternehmen verändern. Dies führt beispielsweise dazu, dass die Konsumenten Höhe und Struktur ihres Konsums anpassen, was ebenfalls auf die Gesamtwirtschaft Einfluss nimmt und gleichzeitig über die

Nachfrage wieder auf die Produktion einwirkt. Die sich daraus ergebenden Effekte repräsentieren die induzierten Effekte. Insgesamt ergeben sich aus den gesamten Effekten nicht nur monetäre Kostengrößen, sondern auch Effekte auf den Arbeitsmarkt.

Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der direkten, indirekten und induzierten Effekte im Modellzusammenhang



Quelle: eigene Darstellung

Zwar können potenziell viele Größen und Variablen eines makro-ökonomischen Modells durch Effekte des Klimawandels oder der Anpassung beeinflusst werden. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit der sich einstellenden Effekte sollten die ökonomischen Wirkungskanäle jedoch gezielt gewählt werden.

Die (bio-)physikalischen Effekte des Klimawandels und der Anpassung lassen sich insbesondere durch 1. Veränderung der Produktionskostenstruktur, 2. Veränderung der Produktivität, 3. Veränderung der Endnachfrage, 4. Veränderung von Investitionen, 5. Veränderung der öffentlichen Ausgaben sowie 6. Veränderung von (Import-)Preisen in einem makro-ökonomischen Modell abbilden (Steininger et al. 2016; Bubeck et al. 2020).

Dies sei hier kurz exemplarisch erläutert. Die genaue Szenarien-Abgrenzung erfolgt in den Unterkapitel von Kapitel 3.1. Die Produktionskostenstruktur ändert sich z.B. im Fall von Niedrigwasser für die Binnenschifffahrt, da Schiffe nur noch anteilig beladen werden können und somit häufiger fahren müssen bzw. eine Umladung auf den Landverkehr erfolgt. Industriebetriebe, die über die Binnenschifffahrt mit Rohstoffen und Vorprodukten beliefert werden, sind somit einer erhöhten Kostenbelastung ausgesetzt. Die Produktivität eines Sektors kann beeinträchtigt werden, z. B. wenn die Arbeitsproduktivität im verarbeitenden Gewerbe aufgrund eines wärmeren Klimas sinkt. Die Struktur der Endnachfrage kann durch Effekte des Klimawandels in unterschiedlicher Weise getroffen werden. Knappheiten bei Gütern können zu Preisreaktionen und damit zu einer Anpassung der Endnachfrage führen. Während sich manche Güter in der Nachfrage substituieren lassen, können andere Güter wiederum nur schwer oder gar nicht ersetzt werden (z.B. lebensnotwendige Ausgaben für Nahrung und Wohnung). Neben den Ausgaben für Konsum können sich auch die Ausgaben für Investitionen durch Effekte des Klimawandels ändern. Zerstörte Gebäude und Infrastruktur müssen wieder aufgebaut werden. Ursprünglich geplante Investitionen in die Modernisierung oder Erweiterung von

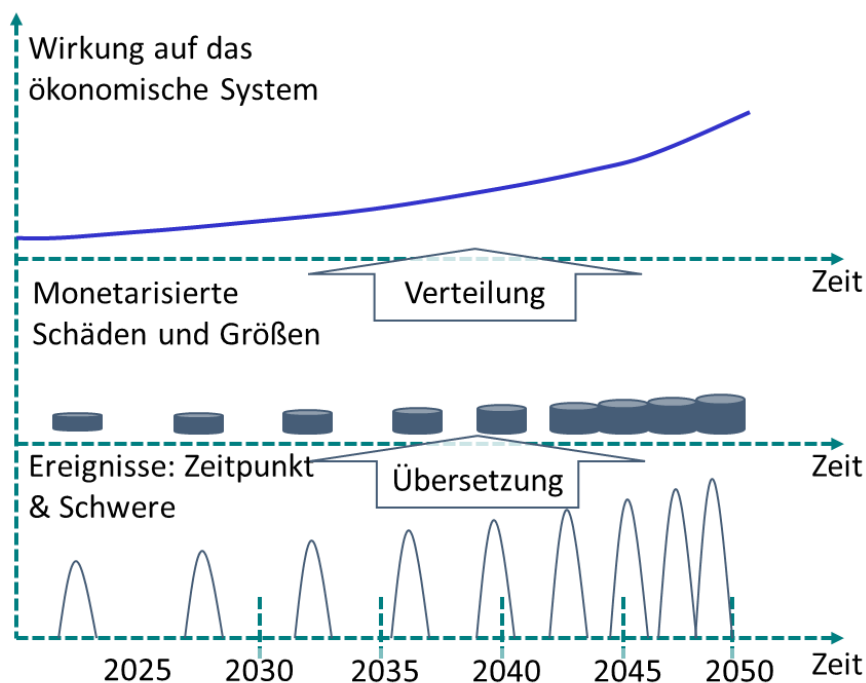
Gebäuden und Infrastruktur müssen daher gestrichen oder aufgeschoben werden, da zunächst der verloren gegangene Gebäudebestand bzw. die beschädigte Infrastruktur wiederhergestellt werden muss. Auch die öffentlichen Ausgaben werden durch die Zahlung von Katastrophenhilfen und öffentlich finanzierte Reparaturleistungen zur Beseitigung von Schäden durch Klimawandel belastet.

Die genannten Kanäle werden jedoch nicht nur durch die Auswirkungen des Klimawandels beeinflusst, sondern auch durch die Anpassung an den Klimawandel kommt es zu ökonomischen Aktivitäten, die sich ebenfalls durch die genannten Wirkungskanäle abbilden lassen. Durch Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft wie z.B. durch eine zusätzliche Bewässerung oder dem Einsatz von anderen Pflanzen- oder Düngersorten verändert sich die Kostenstruktur des Sektors Landwirtschaft, da er eine geänderte Vorleistungsstruktur aufweist. Sowohl auf privater Ebene als auch auf staatlicher Ebene kann die Bauvorsorge zum Schutz gegen zukünftige Naturgefahren zu zusätzlichen Investitionen führen.

Die Klimawirkungen werden nicht als disruptive, schockartige Ereignisse in das Modell PANTA RHEI eingestellt, sondern es werden verstetigte Zeitreihen gebildet, die den Einfluss des Klimawandels enthalten (vgl. Abbildung 6). So muss keine Annahme getroffen werden, in welchen Jahren und mit welcher Frequenz ein Extremwetterereignis tatsächlich auftreten wird.

In den folgenden Abschnitten werden die Szenario-Einstellungen der ausgewählten Klimawirkungen detailliert dargestellt.

Abbildung 6: Darstellung der Klimawirkungen im Modellzusammenhang



Quelle: eigene Darstellung

3.1.1 ERTRAGSAUSFÄLLE IN DER LANDWIRTSCHAFT

Zukünftige Hitze- und Dürreereignisse können einen großen Einfluss auf die landwirtschaftlichen Erträge, die damit zusammenhängenden angebotenen Mengen und schließlich die Preise von landwirtschaftlichen Produkten haben. Dabei bestimmen die folgenden Einflussfaktoren das mögliche Ausmaß der Ertragsausfälle durch den Klimawandel:

- Zeitpunkt, Dauer und Häufigkeit des Auftretens von Hitze und Dürre
- Anbauart (Mais, Raps, Sommerweizen, Winterweizen, Gerste etc.)
- Region
- Zugrunde gelegtes Klimaszenario und Annahmen zur CO₂-Fertilisation

Durch die Abhängigkeit und die gleichzeitige Variabilität der Einflussfaktoren ist die Bandbreite möglicher zukünftig zu erwartender Ertragsrückgänge sehr hoch. Während in den USA beispielsweise die Erträge bei Mais bei Temperaturen bis zu 29 Grad steigen, führt ein einziger Tag mit 32 Grad zu einem Ertragsverlust von 1% (Schlenker & Roberts 2009). Bei den Getreidearten werden Ertragseinbußen durch Hitze und Dürre vorausberechnet, die von -10% bis -15% bei Reis, -10% in Afrika bis -50% in den USA bei Mais sowie -4% in Frankreich bis -23% in der Türkei bei Weizen liegen, während beispielsweise für die trockenresistente Hirse auch bei steigenden Temperaturen mit höheren Erträgen von +14% ausgegangen wird (Wang et al. 2018). Auch Tripathi et al. (2016) weisen abhängig vom Kontinent und von der Anbauart eine hohe Variabilität zukünftiger klimawandelbedingter Ertragseinbußen aus. Hinzu kommt, dass Annahmen zur CO₂ Fertilisation die Vorzeichenrichtung maßgeblich beeinflussen, d.h. es kann zu Ertragssteigerungen statt -einbußen kommen (Ren et al. 2018).

Auch bei Starkregen lässt sich eine hohe Spannbreite möglicher Effekte ausmachen: Sie reicht von keinen nachweisbaren Auswirkungen (Lesk et al. 2016) zu Effekten, die in ihrer Höhe mit denen der Dürre vergleichbar sind (Li et al. 2019). Auch hier kommt es auf die Pflanzenart, die Region und die aktuelle Bodenbeschaffenheit (Mäkinen et al. 2018) sowie Zeitpunkt und Intensität des Ereignisses an.

Für die deutsche Landwirtschaft wird in Brasseur et al. (2017, S. 190) zudem festgestellt, dass „[d]ie Auswirkungen der erwarteten Klimaveränderungen [...] in den nächsten 20-30 Jahren im Wesentlichen beherrschbar [scheinen]“. Damit werden die klimawandelbedingten Kosten für die Landwirtschaft eher durch Entwicklungen auf den Weltmärkten bestimmt.

Generell können Ertragseinbußen aber Klimaanomalien zugeordnet werden, d.h. Klimavariablen erklären einen Großteil der Schwankungsbreite im Ertrag (Beillouin et al. 2020). Tigchelaar et al. (2018) zeigen, dass Produktionsschocks bei Mais durch die Klimaerwärmung wahrscheinlicher werden und zur Volatilität auf den Weltmärkten beitragen.

Ertragseinbußen führen durch die daraus entstehenden Angebotsrückgänge zu Preissteigerungen. Für die Ableitung der Szenario-Einstellung auf monetäre Größen wird deshalb auf Preiswirkungen abgestellt. Genauer werden durch die dargestellte Unsicherheit und Variabilität der genauen klimawandelbedingten Ertragseffekte für die Landwirtschaft in der Szenario-Einstellung globale Preisänderungen unterstellt, die sich an der

Vergangenheit orientieren. Es wird angenommen, dass Ertragsverluste aufgrund des Klimawandels in der Landwirtschaft global wahrscheinlicher werden. Dadurch ist international mit höheren Preisen zu rechnen. Durch die Klimawandelfolgen erschweren sich auch national die Produktionsbedingungen und resultieren in Preissteigerungen. Dies folgt der Argumentation in Knittel et al. (2020), wo darauf hingewiesen wird, dass nationale Klimafolgen durch internationalen Handel zu einem globalen Problem für viele Länder werden. Zusätzlich zu den globalen Effekten wird angenommen, dass die Landwirte die zu erzielenden Preise dem Weltmarktpreis anpassen. Die Landwirtschaft ist zentraler Zulieferer der Lebensmittelindustrie. Die weltweit steigenden Preise für Agrarprodukte verteuern die internationale Produktion von Lebensmitteln und werden global zu steigenden Preisen von Lebensmittelprodukten führen. Da die Landwirtschaft 20% zu den verwendeten Vorleistungen in der Herstellung von Lebensmittel beitragen, überträgt sich auch die Preissteigerung von landwirtschaftlichen Produkten nur zu 20%. Neben dem Wirkungskanal globaler Preissteigerungen wird auch die nationale Flächenkonkurrenz und die damit zusammenhängende Verteuerungen der Fläche als Wirkmechanismus auf Produktion und Erträge eingesetzt. Hier liegt die Annahme zu Grunde, dass durch den Klimawandel das nutzbare Land innerhalb Deutschlands zunehmend knapper wird und der Ertrag pro ha zurückgeht.

Bei **starkem Klimawandel** wird unterstellt, dass sich die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate für importierte Agrarprodukte der letzten dreißig Jahre (1991 bis 2020) verdoppelt. Die Importpreise steigen über den Gesamtzeitraum um ca. 50%. 2050 liegen sie 19% über den Importpreisen des Referenzlaufs (ohne voranschreitenden Klimawandel). Für die inländischen Produktionspreise wird dasselbe durchschnittliche jährliche Wachstum unterstellt, sodass die Preise 2050 um 9% höher liegen als im Basislauf. Die Importpreise von Lebensmittelprodukten fallen 2050 um 4% höher aus als in der Basisvariante. Des Weiteren nehmen die Preise für Flächen durch die steigende Flächenkonkurrenz deutlich zu. Der Inputkoeffizient, d.h. die Höhe der Vorleistungen, welche die Landwirtschaft von der Immobilienbranche bezieht, entspricht der Preissteigerung beim Kaufwert je ha Landfläche von 2011-2020 und steigt somit auf das Doppelte. 2050 ergibt sich daraus eine Abweichung zwischen Basisverlauf und Szenario in Höhe von 100%.

Bei **schwachem Klimawandel** wird angenommen, dass sich die durchschnittliche jährliche Import-Preissteigerung der letzten zwanzig Jahre in Höhe von 1% p.a. auch in Zukunft fortsetzen wird. Die bisher zu beobachtende Verringerung in den durchschnittlichen Wachstumsraten im letzten Jahrzehnt (0,6% p.a. 2011-2020) gegenüber dem vorletzten Jahrzehnt (0,8% p.a. 2001-2010) wird durch den Klimawandel und die damit zusammenhängenden globalen Ertragsverluste also gestoppt. Der Importpreis für Produkte der Landwirtschaft liegt 2050 dadurch 7% über dem des Basisszenarios, der Produktionspreis 6% und der Importpreis für Lebensmittelprodukte um 1%. Hinsichtlich der Flächenkonkurrenz wird unterstellt, dass die Preise für Flächen nur langsam zu nehmen, da das 20 ha Ziel erreicht wird, die nutzbare Fläche nicht so extrem zurückgeht und dadurch nur eine geringe Konkurrenz resultiert. Der Inputkoeffizient erreicht 2050 wieder den maximalen Wert von 2011. Dies bedeutet, dass der Einsatz von Immobilienleistungen in der Landwirtschaft 2050 um 17% höher liegen als im Basislauf.

Das **mittlere Klimawandelszenario** befindet sich von den Einstellungen her direkt zwischen der schwachen und starken Variante. Dadurch lässt sich identifizieren, ob ein rein

linearer Übergang zwischen den Szenarien vorherrscht oder ob es einen Schwellenwert gibt, ab dem die Kosten schneller / langsamer zunehmen.

3.1.2 HOLZERTRAG IN DER FORSTWIRTSCHAFT

Wie bereits bei der Landwirtschaft gibt es in der Literatur nicht die eine konkrete Aussage zur klimawandelbedingten Veränderung des Holzertrags, sondern eine hohe Bandbreite an möglichen Entwicklungen. Die Ergebnisse hängen von der Waldzusammensetzung, dem klimatischen Standort und sehr vielen weiteren Faktoren ab. So betonen Brasseur et al. (2017, S. 196), dass „[z]uverlässige Aussagen zu den direkten und indirekten Folgen des Klimawandels [...] schwierig [sind], weil es komplexe Wechselwirkungen zwischen potenziellen Wirtsbaumarten und dem Klimawandel gibt“. Die Modellergebnisse schwanken zudem merklich mit der Setzung der Annahmen (Augustynczyk et al. 2017). Auch konkrete Berechnungen für Deutschland aus Tei et al. (2017) weisen für den Zeitraum 2006 bis 2100 eine hohe Spannweite von -0,02 bis +0,02 für die Nettoproduktion auf. Generell geht aber durch den weltweiten Klimawandel die potenzielle Landfläche zur Waldnutzung zurück (Alegria et al. 2020). Es ist zu erwarten, dass die Schäden durch Schädlingsbefall und die Verluste durch Waldbrände insgesamt zunehmen, was sich in langfristig steigenden Preisen niederschlägt. Für diese Analyse wird davon ausgegangen, dass die Erträge in der Forstwirtschaft in Zukunft nicht mehr so leicht zu erzielen sind und sich die relativ stabilen Importpreise auf Dauer nicht mehr halten lassen. Die Szenario-Einstellungen basieren deshalb wie bei der Landwirtschaft auf Preisentwicklungen bei Importen, Produktion und Landfläche. Eng verflochten mit der Forstwirtschaft ist die Holzverarbeitung (Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren, ohne Möbel), die 10 % ihrer eingesetzten Vorleistungen von der Forstwirtschaft bezieht.

Bei **starkem Klimawandel** wird unterstellt, dass die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate für importierte forstwirtschaftlicher Produkte der letzten dreißig Jahre (1991 bis 2020) wieder erreicht wird. Die Importpreise steigen über den Gesamtzeitraum um ca. 105 %. 2050 liegen sie 81 % über den Importpreisen des Basislaufs. Für die inländischen Produktionspreise wird dasselbe durchschnittliche jährliche Wachstum unterstellt, sodass die Preise 2050 um 51 % höher liegen als im Basislauf. Die Importpreise der Holzverarbeitenden Industrie fallen 2050 um 8 % höher aus als in der Basisvariante. Des Weiteren nehmen die Preise für Flächen deutlich zu. Der Inputkoeffizient, d.h. die Höhe der Vorleistungen, welche die Forstwirtschaft von der Immobilienbranche bezieht, entspricht der Preissteigerung beim Kaufwert je ha Landfläche von 2011-2020 und steigt somit auf das doppelte. 2050 ergibt sich daraus eine Abweichung zwischen Basisverlauf und Szenario in Höhe von 100 %.

Bei **schwachem Klimawandel** wird angenommen, dass sich die durchschnittliche jährlichen Import-Preissteigerungen der letzten zwanzig Jahre in Höhe von 1,2% p.a. auch in Zukunft fortsetzen werden. Die bisher zu beobachtende Verringerung in den durchschnittlichen Wachstumsraten im letzten Jahrzehnt (0,6% p.a. 2011-2020) gegenüber dem vorletzten Jahrzehnt (1,2% p.a. 2001-2010) wird durch den Klimawandel und die damit zusammenhängenden globalen Ertragsverluste durch Stürme, Hitze, Schädlingsbefall etc. gestoppt. Der Importpreis für Produkte der Forstwirtschaft liegt 2050 dadurch 24 % über dem des Basisszenarios, der Produktionspreis 4 % und der Importpreis für Produkte der Holzverarbeitung um 2 %. Hinsichtlich der Flächenkonkurrenz wird

unterstellt, dass die Preise für Flächen nur langsam zu nehmen und der Inputkoeffizient auch zukünftig auf dem maximalen Wert von 2018 verbleibt. Der Einsatz von Immobilienleistungen in der Forstwirtschaft entspricht damit dem des Basislaufs.

Das **mittlere Klimawandelszenario** befindet sich von den Einstellungen her wie bei der Landwirtschaft direkt zwischen der schwachen und starken Variante.

3.1.3 SCHÄDEN AN GEBÄUDEN UND INFRASTRUKTUR

Die durch Klimawandel ausgelösten Extremwetterereignisse führen unmittelbar zu Schäden an Gebäuden und Infrastruktur. In Abhängigkeit des jeweils betrachteten Ereignisses werden unterschiedliche Arten von Gebäuden und Infrastruktur in einem unterschiedlichen Ausmaß getroffen. Bis zum Jahr 2021 waren es laut GDV insbesondere Flusshochwasser, welche die schwersten Überschwemmungen und monetär den höchsten Schadenaufwand in der Sach-Elementarversicherung verursacht haben: Nach einer Hochrechnung von GDV (2021), bei der die jeweiligen Schäden auf Preise von 2020 umgerechnet wurden, ergibt sich für das August-Hochwasser von 2002 einen Schadenaufwand von ca. 4,65 Mrd. Euro und für das Juni-Hochwasser von 2013 einen Schadenaufwand von ca. 2,24 Mrd. Euro. Die schweren Starkregen mit Sturzfluten im Sommer 2021 haben diesen Schadenaufwand deutlich übertroffen. Allein die versicherten Schäden werden auf über 8 Mrd. Euro (hochgerechnet auf Bestand und Preise 2020) geschätzt (GDV 2022), hinzu kommen noch die unversicherten Schäden. Trenczek et al. (2022a) haben im Rahmen dieses Vorhabens eine Untersuchung der direkten und indirekten Schäden der Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021 durchgeführt und eine Gesamtschadenshöhe von mindestens 40,5 Mrd. Euro ermittelt. Damit ist das Jahr 2021 das bislang schadenträchtigste Jahr.

Die Schadenstatistiken für die vergangenen Jahre verdeutlichen, dass eine Abschätzung zukünftig zu erwartender Schäden an Gebäuden und Infrastruktur nur mit großen Unsicherheiten möglich ist. Sowohl die Häufigkeiten des Auftretens als auch das Ausmaß der damit einhergehenden Schäden können nicht sicher vorhergesagt werden. Die Höhe der anfallenden Schäden an Gebäuden und Infrastruktur ist davon abhängig, wie großflächig ein Starkregenereignis tatsächlich ist, wie ortsfest das entsprechende Regengebiet ist, wo genau es sich abregnet und wie die topografischen und infrastrukturellen Gegebenheiten an diesem Ort tatsächlich sind. Im Juli 2014 fielen bspw. in Münster über 290 l/m² Regen in sieben Stunden, eine der höchsten jemals gemessenen Werte in ganz Deutschland seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Überschwemmungen von Häusern und Industriegebäuden waren die Folge. Im Vergleich dazu wurden im Ahrtal 2021 neben Überschwemmungen ganze Häuser und Brücken weggerissen. Ein Grund hierfür war die gebirgsartige Landschaft, die zu einer Kanalisation der Regenfälle und somit zu rasch steigenden Pegelständen im Flusstal geführt hat. Dadurch wurde das Ausmaß der Schäden deutlich verstärkt. Hinzu kommt, dass durch Überschwemmungen und Starkregen verursachte Schäden an Gebäuden nur durch eine Elementarschadenversicherung abgedeckt werden, welche jedoch für weniger als 50 Prozent der Gebäude in Deutschland besteht.

3.1.3.1 Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen

Gebäude können in Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude unterschieden werden.

Erstere dienen primär dem Wohnzweck und können sich als Eigentum im Besitz von privaten Haushalten oder der Wohnungswirtschaft befinden. Letztere können sich im Besitz von Unternehmen befinden und zur Produktion von Gütern und Erbringung von Dienstleistungen genutzt werden.

Starkregen kann überall auftreten und Gebäude zerstören. Die KWRA 2021 für Deutschland beschreibt im Teilbericht 4 zum Cluster Infrastruktur die möglichen Schäden: Keller sind das am häufigsten betroffene Geschoss, die verbauten Materialien beeinflussen das Schadenausmaß maßgeblich, Kontaminationen mit Schmutzwasser oder anderen Stoffen und Ölen vergrößern das Schadenausmaß ebenfalls deutlich. Ebenfalls relevant sind im Keller verbaute Technik und ob dieser zu Wohn- und Arbeitszwecken ausgebaut wurde. Als weitere Sensitivitätsfaktoren werden unzureichender Schlagregenschutz, der Ausbau von Dachgeschossen und Dachterrassen sowie Materialwechsel zum Beispiel durch Dachgauben oder ähnliches bei Dächern angeführt (Voß et al. 2021).

In einem Forschungsprojekt von DWD und GDV wurden die Starkregenereignisse seit 2001 mit den Schadensdaten der deutschen Versicherer verknüpft, um das Schadenausmaß und -potenzial von Starkregen zu identifizieren. Im Zeitraum von 2002 bis 2017 zerstörte Starkregen Werte an Wohngebäuden von rund 6,7 Mrd. Euro in Preisen von 2017 auf 100 % Versicherungsdichte hochgerechnet. Die Anzahl der Schäden betrug 1,3 Millionen. Insgesamt gab es bundesweit mehr als 11.000 Starkregenereignisse. Diese können überall in Deutschland mit einer ähnlich hohen Wahrscheinlichkeit auftreten (GDV & DWD 2019).

Starkregengefahrenkarten bieten eine Möglichkeit, die potenziell bei Starkregen überfluteten Flächen zu identifizieren und so Rückschlüsse auf die betroffenen Gebäude und Infrastruktur zu ziehen. Die tatsächlichen Schäden hängen jedoch von den genannten Schadenspotenzialen und -sensitivitäten der Gebäude ab. Die potenziellen Schäden können deshalb nur in einem regionalen Kontext unter Beachtung der jeweiligen regionalen Gefährdung von Hochwasser und Sturzfluten ermittelt werden (Bubeck et al. 2020).

Für die Ableitung von zukünftig zu erwartenden Schäden an Gebäuden durch Starkregen lassen sich keine klaren Trends bei der Entwicklung der Niederschläge ableiten. Sommerliche Starkregenereignisse sind maßgeblich für Gebäudeschäden, jedoch lässt sich aus täglichen Niederschlagssummen der Vergangenheit kein eindeutiger Trend für die Zukunft ableiten. Es wird jedoch eine Zunahme von kurzen, hochintensiven Starkregenereignissen erwartet (Voß et al. 2021). Für eine längerfristige räumliche Prognose des klimatischen Einflusses auf zukünftige Gebäudeschäden durch Starkregen liegen ebenfalls keine ausreichenden Daten vor (Voß et al. 2021). Es kann jedoch damit gerechnet werden, dass die zukünftigen Starkregenereignisse noch intensiver ausfallen werden.

Die unmittelbaren (und sichtbaren) ökonomischen Effekte der Schäden an Gebäuden durch Starkregen ergeben sich durch den Wert der beschädigten Gebäude. Zur Bestimmung der volkswirtschaftlichen Folgekosten ist es jedoch notwendig, die Folgewirkungen von beschädigten Gebäuden im ökonomischen System zu identifizieren und zu quantifizieren (Bubeck et al. 2020). Die Reparatur bzw. Wiederherstellung von beschädigten Gebäuden gibt über Bauinvestitionen einen Impuls in die Wirtschaft und es

ergeben sich schließlich vielfältige (auch positive) Reaktionen und Wirkungen.

Bubeck et al. (2020) erläutern die unterschiedlichen Wirkungen, die sich durch klimabedingte Schäden am Gebäudebestand ergeben können. Klimabedingte Schäden können zum einen Industriegebäude und Anlagen betreffen, was einer Verringerung des produktiven Kapitalstocks gleichkommt. Als Folge kommt es entweder 1. Zu einem Wiederaufbau des Kapitalstocks durch Investitionen oder aber 2. Die Schäden am Kapitalstock werden nicht behoben.

Für den Fall 1 des Wiederaufbaus gilt: Zur Wiederherstellung des Kapitalstocks werden Investitionsgüter produziert und Dienstleistungen in Anspruch genommen, was unmittelbar zu positiven Wachstumsimpulsen in der Volkswirtschaft führt. Sollte der Wiederaufbau zeitnah erfolgen können, kommt es lediglich zu einer Verschiebung von wirtschaftlichen Aktivitäten und Produktion, nicht aber zu Produktionsausfällen.

Im zweiten Fall kommt es zu einer dauerhaften Schwächung der Volkswirtschaft, da mit dem verringerten Kapitalstock ein dauerhaft verringertes Produktionspotential der Volkswirtschaft einhergeht. Ein solcher negativer Impuls für die Wirtschaft zieht weitere negative Effekte nach sich wie sinkende Beschäftigung, sinkenden Konsum etc.

Durch Schäden an Wohngebäuden sehen sich Haushalte direkt mit den Folgen des Klimawandels konfrontiert. Wenn die Haushalte gegen Elementarschäden versichert sind, kommt die Versicherung für die Schäden auf. Andernfalls müssen die Haushalte mit eigenen Mitteln den Wiederaufbau ihrer Immobilien finanzieren. Diese Investitionen finden anstelle anderer Konsumententscheidungen statt.

Zur Verstetigung der Einzelereignisse im Zeitablauf wird für die Szenario-Modellierung unterstellt, dass die Unternehmen und Haushalte ihr Risiko, dass ihre Gebäude infolge von Starkregen durch den Klimawandel beschädigt werden, erkennen und entsprechende Rücklagen bzw. Sicherheiten bilden. Für Haushalte bedeutet das im Modellkontext, dass sie mehr sparen und für Unternehmen, dass sie monetäre Mittel vorhalten, um bei zukünftig auftretenden klimabedingten Schäden entsprechend reagieren zu können. In beiden Fällen werden jeweils monetäre Mittel der Verwendung in der Volkswirtschaft vorenthalten, was einen negativen Impuls für die Ökonomie zur Folge hat.

Weiterhin wird unterstellt, dass Versicherer die zu erwartenden klimawandelbedingten Schäden in ihre Prämien einpreisen werden und diese sukzessive erhöhen müssen, damit das Geschäftsfeld weiterhin funktioniert. Bei Vermieterinnen und Vermieter wird erwartet, dass die gestiegenen Versicherungsprämien an die Mieterinnen und Mieter weitergegeben werden, was sich in steigenden Mieten ausdrücken wird. Auch knapper Wohnraum durch zerstörte Gebäude lässt die Mieten potenziell steigen.

3.1.3.2 Beschädigung oder Zerstörung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste

Neben Schäden durch Starkregen (siehe Abschnitt 3.1.3.1) und Flusshochwasser (siehe Abschnitt 3.1.3.3) können Gebäude und Infrastruktur insbesondere auch seeseitigen Belastungen ausgesetzt sein, die sich durch den Klimawandel in Zukunft verstärken können. Sturmfluten und steigende Meeresspiegel treffen küstennahe Gebiete und sorgen für Überschwemmungen und somit zu Schäden an Siedlungen und Infrastruktur. Die

küstennahen Industriegebiete sind häufig auch starke Wirtschaftszentren für die jeweiligen Küstenregionen. Die KWRA 2021 nennt z.B. den Straßen- und Maschinenbau, die Rohstoffverarbeitung sowie die Chemie- und Dienstleistungssektoren als wichtige Branchen im Küstenbereich. Ebenfalls dazu zählen wichtige Hafenstandorte wie der Hamburger Hafen oder die Häfen in Bremerhaven und Wilhelmshaven (Fritsch et al. 2021). Es existieren bereits Schutzmaßnahmen wie z.B. Fluttore in den Küstenregionen, um sich gegen Sturmfluten und schnell steigendes Wasser zu schützen. Das Ausmaß der Schäden an Siedlungen und Infrastrukturen in Küstengebieten durch Sturmfluten und Überschwemmungen ist daher stark von der Widerstandsfähigkeit der Küstenschutzsysteme abhängig (vgl. Fritsch et al. 2021).

Die KWRA 2021 (vgl. Fritsch et al. 2021) gibt mit Blick auf die Mitte des Jahrhunderts an, dass es bei der Entwicklung von Sturmfluten zu keinen signifikanten Änderungen kommen wird. Allerdings bewirkt der Meeresspiegelanstieg einen Anstieg der Extremwasserstände bei Sturmflut, sodass die Sturmfluten zwar nicht häufiger, dafür aber in ihrer Wirkung extremer sein werden. Der Meeresspiegel ist bereits jetzt messbar gestiegen und wird entsprechend globalen Projektionen mit hohem Risiko noch weiter ansteigen, was zu Erosionsprozessen an der Ostsee, zu einer Zunahme der Überflutungsdauern der Wattflächen und zu einer höheren Belastung mit möglichem Versagen der Küstenschutzsysteme führen wird. In Kombination mit Sturmfluten und den damit verbundenen Extremwasserständen sind die küstennahen Siedlungen und Infrastrukturen dadurch vermehrt auch seeseitigen Belastungen ausgesetzt.

Ähnlich wie bei Starkregenereignissen kommt es bei Sturmfluten oder Extremwasserständen zu wasserbedingten Feuchtigkeitsschäden an Wohngebäuden und Industriegebäuden. Dementsprechend können die oben bereits aufgezeigten Wirkungskanäle auch für die Küstenregion herangezogen werden und werden daher gemeinsam diskutiert.

3.1.3.3 Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser

Wie bereits in Abschnitt 3.1.3.1 dargestellt, stellen die durch extreme Niederschläge ausgelösten Flusshochwasser in Deutschland in der Schadenstatistik der Versicherer die Ereignisse mit dem höchsten wirtschaftlichen Schadensausmaß dar. Bei den beiden Sommerhochwasser 2002 und 2013 waren insbesondere die Einzugsgebiete von Elbe und Donau betroffen, 2013 kamen noch die Einzugsgebiete von Rhein und Weser hinzu (Voß et al. 2021). Der Uferübertritt von Wasser führt zu Überschwemmungen, welche unmittelbar zu Schäden an flusnahen Gebäuden und Infrastruktur führen.

Die KWRA 2021 verdeutlicht die begrenzten Möglichkeiten zur Abschätzung zukünftiger Schäden durch Flusshochwasser. Ähnlich wie bei Starkregen ist die Prognosemöglichkeit für das Auftreten von Flusshochwasser in der Zukunft nicht bzw. nur mit hoher Unsicherheit möglich. Zeitlich traten die Flusshochwasser in der Vergangenheit sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr auf. Eine Analyse der vergangenen Hochwassertage lässt keinen eindeutigen Trend für das Auftreten von Jahrhunderthochwassern erkennen. Auch räumliche Schwerpunkte lassen sich nicht ausmachen, da sich diese jeweils aus besonderen Witterungsverhältnissen ergaben. Zwar konnte in der Vergangenheit eine Zunahme von Hochwasserabflüssen identifiziert werden, die jedoch nicht mit nennenswerten Schäden einhergingen. Die Schadensmodellierung von

Flusshochwasserereignissen ist aktuell Gegenstand der Forschung und mit hoher Unsicherheit verbunden. Es wird angenommen, dass die Schäden in Zukunft klimawandelbedingt zunehmen könnten. Auch die KWRA 2021 kann die Klimawirkungen für Hochwasserereignisse und die hochwasserauslösenden Witterungsbedingungen nicht operationalisieren oder ausweisen. Die Möglichkeiten einer belastbaren Zukunftsprojektion sind begrenzt und eine Interpretation von Bemessungsfragen ist nur unter großen Vorbehalten möglich (Voß et al. 2021).

Ähnlich wie bei Starkregenereignissen kommt es durch Flusshochwasser zu wasserbedingten Schäden an Wohngebäuden und Industriegebäuden. Dementsprechend können die oben bereits aufgezeigten Wirkungskanäle auch für Flusshochwasser herangezogen werden und werden daher gemeinsam diskutiert.

3.1.3.4 Klimawirkungsübergreifende Quantifizierung

Die klimawandelbedingten Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Starkregen, Flusshochwasser sowie Sturmfluten an der Küste ähneln sich dahingehend, dass es jeweils zu Überschwemmungen und Schäden durch das eindringende Wasser kommt. Im Detail können Unterschiede auftreten, wie z.B. Schäden durch Salz und Wellenschlag bei Sturmfluten oder die Dauer und Ölschäden bei Deichbrüchen, die allerdings nicht in der Szenario-Modellierung bzw. im Modellzusammenhang aufgegriffen werden können. Die genaue Art der Schäden an Gebäuden und Infrastruktur wird daher nicht weiter spezifiziert, sondern als Gesamtsumme über alle Ereignisse ermittelt und über die Jahre verteilt, um die Folgen des Klimawandels zu verstetigen. Die obigen Ausführungen haben zudem verdeutlicht, dass die Quantifizierung der zukünftigen Schäden jeweils mit höchster Unsicherheit verbunden ist bzw. gar nicht möglich und daher nicht detailgetreu bzw. detailliert in die Szenario-Modellierung als Input in das makro-ökonomische Modell eingehen kann.

Vielmehr wird unterstellt, dass von Versicherungen, Unternehmen und Haushalten Vorsorge für zukünftige Wasserschäden durch Starkregen, Überschwemmungen und Flut getroffen wird. Unabhängig davon, ob die Handelnden tatsächlich von diesen Ereignissen heimgesucht werden, bilden sie Rückstellungen, um im Fall der Fälle Reparaturen und Wiederaufbau oder Schadenszahlungen finanzieren zu können. Im Einzelnen wird also angenommen, dass Versicherungen die drohenden erhöhten Aufwendungen für die zu kompensierenden Schäden in ihre Prämien einpreisen und die Preise für Versicherungsdienstleistungen anheben werden. Auf Seiten der Vermieter:innen wird angenommen, dass sie zum einen die steigenden Versicherungskosten über Mietpreissteigerungen an ihre Mieter:innen weitergeben. Zum anderen wird erwartet, dass für zukünftige klimabedingte Reparaturaufwendungen, die nicht über Versicherungen abgedeckt sind, Rücklagen gebildet werden, indem die Mieten innerhalb des gesetzlichen Rahmens angehoben werden. Auch die privaten Haushalte stärken über höhere Spareinlagen durch reduzierte Konsumausgaben ihre finanzielle Schlagkraft, um bei Bedarf unversicherte Schäden an Wohneigentum reparieren und nicht-versicherten Hausrat ersetzen zu können. Zuletzt wird davon ausgegangen, dass auch Unternehmen eine finanzielle Reserve bilden, um unversicherte Schäden reparieren und Produktionsausfälle auffangen zu können.

Genauer wird bei **starkem Klimawandel** damit gerechnet, dass klimawandelbedingte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur deutlich häufiger auftreten werden. Es wird unterstellt, dass **Versicherungen** von einer Erhöhung der von ihnen zu begleichenden Schadenssummen um durchschnittlich 2,5 Mrd. Euro jährlich ausgehen. Da mit einem zunehmenden Auftreten von Extremereignissen zur Mitte des Jahrhunderts zu rechnen ist, liegt die Summe 2050 um fast 5 Mrd. Euro höher als unter Gegebenheiten ohne voranschreitenden Klimawandel. Nach Trenczek et al. (2022b) lagen die Schäden durch Sturzfluten, Überschwemmungen und Starkregen im Zeitraum 2000 bis 2021 bei 71 Mrd. Euro, was einem jährlichen Betrag von 3,2 Mrd. Euro entspricht. Bei einer bisherigen Versicherungsdichte von 50% entfielen also nach dieser Abschätzung ca. 1,6 Mrd. Euro der Schäden jährlich auf die Versicherungen. Aufgrund des starken Klimawandels wird also angenommen, dass die Versicherungen mit 2,5fach höheren Schadenssummen rechnen. Die Preise von Versicherungsleistungen erhöhen sich dadurch gegenüber der Referenz um 0,15%-Punkte p.a. Für private Haushalte ergibt sich daraus eine durchschnittliche jährliche Verbraucherpreissteigerung für Versicherungsleistungen in Höhe von 0,51%, die um 0,06%-Punkte über der Entwicklung ohne voranschreitenden Klimawandel liegt.

Beim **Grundstücks- und Wohnungswesen** werden zwischen 2022 und 2050 zusätzliche Rückstellungen in Höhe von 11,6 Mrd. Euro pro Jahr unterstellt, wobei der zusätzliche Betrag zu Beginn niedriger liegt und mit ansteigender Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadensereignisses zur Mitte des Jahrhunderts am höchsten wird. So ergibt sich für 2050 eine Differenz zur Referenz (ohne voranschreitenden Klimawandel) von 27 Mrd. Euro. Nach den Berechnungen von Trenczek et al. (2022b) entfallen 70% der Schäden durch Sturzfluten, Überschwemmungen und Starkregen, also 50 Mrd. Euro insgesamt oder 2,3 Mrd. Euro p.a. auf Schäden an Gebäuden und Infrastruktur. Das Grundstücks- und Wohnungswesen muss bei starkem Klimawandel also von einer erhöhten Belastung ausgehen. Es wird also angenommen, dass zur Begleichung zukünftiger möglicher Schäden Summen zurückgehalten werden, die das 6fache der bisher beobachtbaren Schäden übersteigen. Die Preise für Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens erhöhen sich dadurch um 1% p.a. (+0,1 %-Punkte p.a. gegenüber der Referenz), die Mieten steigen um 1,1% p.a. (+0,02 %-Punkte p.a. gegenüber der Referenz).

Als Reaktion auf die Preissteigerungen bei Versicherungen und Mieten sowie zum Anlegen von finanziellen Reserven für den Ernstfall reduzieren die **privaten Haushalte** ihre Konsumausgaben. Es wird unterstellt, dass sich die Ausgaben für den privaten Konsum preisbereinigt um durchschnittlich jährlich 7,3 Mrd. Euro reduzieren, d.h. 2050 liegen die Konsumausgaben um 0,7% bzw. 15 Mrd. Euro niedriger als in der Referenz. Die Sparquote hingegen liegt um 0,4%-Punkte höher. Insgesamt steigt die Sparquote über dem gesamten Zeitraum (2022-2050) um durchschnittlich 0,2 Prozentpunkte pro Jahr.

Die **Unternehmen** erhöhen ihre Rückstellungen zwischen 2022 und 2050 um 4,7 Mrd. Euro pro Jahr, wobei auch hier der zusätzliche Betrag über den Zeitraum bis zur Mitte des Jahrhunderts kontinuierlich ansteigt. 2050 werden die Rückstellungen 11 Mrd. Euro über denen in der Referenz (ohne voranschreitenden Klimawandel) liegen. Nach Trenczek et al. (2022b) lagen die Schäden durch Sturzfluten, Überschwemmungen und Starkregen im Zeitraum 2000 bis 2021 bei 71 Mrd. Euro, was einem jährlichen Betrag von 3,2 Mrd. Euro entspricht. Zudem entfallen nach ihren Berechnungen etwa 30%

dieser Schäden auf die gewerbliche und industrielle Infrastruktur, was ca. 1 Mrd. Euro pro Jahr entspricht. Dieser Betrag lässt sich also für die Vergangenheit durchschnittlich den Unternehmen zurechnen. Weiterhin ließ sich für die Vergangenheit beobachten, dass die Schäden in der jüngsten Vergangenheit gegenüber früheren Jahren deutlich zugelegt haben (Trenczek et al. 2022b). Im Rahmen des Szenarios wird also unterstellt, dass sich die Steigerung über die kommenden Jahre weiter fortsetzt und sich die bisher beobachteten Schadenssummen für Gewerbe und Industrie gegenüber der Vergangenheit fast versechsfachen werden.

Im Szenario mit **schwachem Klimawandel** wird angenommen, dass klimawandelbedingte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur im Vergleich zur Vergangenheit häufiger auftreten werden. Es wird unterstellt, dass **Versicherungen** von einer Erhöhung der von ihnen zu begleichenden Schadenssummen um durchschnittlich 0,9 Mrd. Euro jährlich ausgehen. Wie bereits beim starken Klimawandel wird auch hier ein zunehmendes Auftreten von Extremereignissen zur Mitte des Jahrhunderts erwartet. Die Summe liegt 2050 um 2 Mrd. Euro höher als unter Gegebenheiten ohne voranschreitenden Klimawandel. Mit dieser Entwicklung wird angenommen, dass die Versicherungen mit 1,6fach höheren Schadenssummen rechnen. Die Preise von Versicherungsleistungen erhöhen sich dadurch gegenüber der Referenz um 0,07%-Punkte p.a. Für private Haushalte ergibt sich daraus eine durchschnittliche jährliche Verbraucherpreissteigerung in Höhe von 0,48%, die um 0,03%-Punkte höher liegt als ohne voranschreitenden Klimawandel.

Beim **Grundstücks- und Wohnungswesen** werden zwischen 2022 und 2050 zusätzliche Rückstellungen in Höhe von 3,3 Mrd. Euro pro Jahr unterstellt, wobei der zusätzliche Betrag zur Mitte des Jahrhunderts am höchsten wird. So ergibt sich für 2050 eine Differenz zur Referenz von 8 Mrd. Euro. Es wird also angenommen, dass zur Begleichung zukünftiger möglicher Schäden Summen zurückgehalten werden, die das 2,5-fache der bisher beobachtbaren Schäden übersteigen. Die Preise für Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens erhöhen sich dadurch um 0,9% p.a. (+0,03 %-Punkte p.a. gegenüber der Referenz), die Mieten steigen um 1,0% p.a. (+0,01 %-Punkte p.a. gegenüber der Referenz).

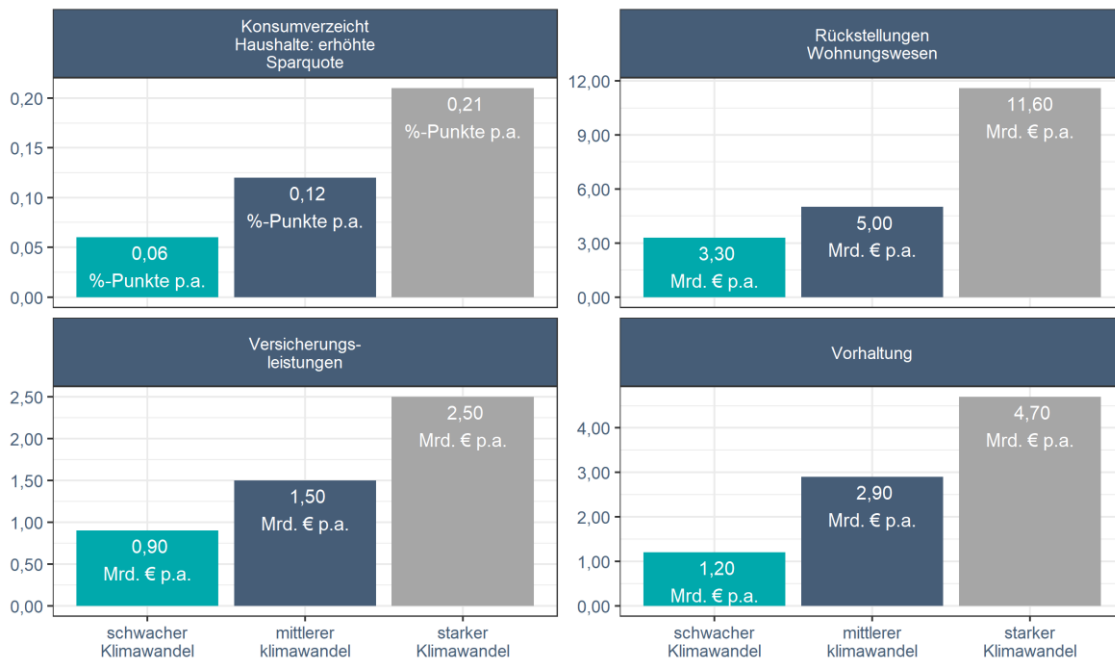
Bei den **privaten Haushalten** wird unterstellt, dass sich die Ausgaben für den privaten Konsum preisbereinigt um durchschnittlich jährlich 2,1 Mrd. Euro reduzieren, d.h. 2050 liegen die Konsumausgaben um 0,2% bzw. 4 Mrd. Euro niedriger als in der Referenz. Die Sparquote hingegen liegt um 0,1%-Punkte höher. Insgesamt steigt die Sparquote über dem gesamten Zeitraum (2022-2050) um durchschnittlich 0,1 Prozentpunkte pro Jahr.

Die **Unternehmen** erhöhen ihre Rückstellungen zwischen 2022 und 2050 um 1,2 Mrd. Euro pro Jahr, wobei auch hier der zusätzliche Betrag über den Zeitraum bis zur Mitte des Jahrhunderts kontinuierlich ansteigt. 2050 werden die Rückstellungen 3 Mrd. Euro über denen in der Referenz (ohne voranschreitenden Klimawandel) liegen. Im Rahmen des Szenarios wird also unterstellt, dass sich die bisher beobachteten Schadenssummen für Gewerbe und Industrie gegenüber der Vergangenheit mehr als verzweifachen werden.

Bei einer unterstellten **mittleren Entwicklung** des Klimawandels liegen die Werte zwischen dem schwachen und dem starken Klimawandel.

Abbildung 7 fasst die angenommenen Parameter für die Szenarien zusammen.

Abbildung 7: Quantifizierung der durch Schäden an Gebäuden und Infrastruktur ausgelösten Folgewirkungen



Quelle: eigene Darstellung

3.1.4 BINNENSCHIFFFAHRT UND WARENVERKEHR

3.1.4.1 Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Niedrigwasser) und Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)

Binnenschiffe transportieren vor allem Masse- und Schüttgüter wie Erze, Steine und Erden, Mineralölzeugnisse und Kohle (DLR et al. 2022). Über deutsche Binnenschiffahrtsstraßen werden jährlich etwa 200 Millionen Tonnen transportiert (DLR et al. 2022). Der Anteil der Binnenschiffahrt an der Güterverkehrsleistung beträgt knapp über 7 Prozent. Die bedeutendste Binnenwasserstraße in Deutschland ist der Rhein, über welchen mehr als 60 Prozent des europäischen und 80 Prozent des deutschen Gütertransports der Binnenschiffahrt erfolgen (Wolf et al. 2021).

Die Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass Niedrigwasserereignisse häufiger und intensiver werden, vor allem ab der Mitte bis zum Ende des Jahrhunderts (Nilson et al. 2020). Bei Niedrigwasserereignissen kommt es nicht zu einer Sperrung der Wasserstraße, allerdings ist die Befahrbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen durch verringerte Fahrwassertiefe und -breite sowie Möglichkeiten zum Begegnen und Überholen eingeschränkt (Voß et al. 2021). Dies führt zu Verringerungen der Transportmengen und Erhöhung der Transportkosten, sodass möglicherweise Lieferverzögerungen und Verlagerungen auf andere Verkehrsträger erfolgen (Voß et al. 2021). Die Wirkungskette der Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen setzt sich somit weiter auf die betroffenen Industrien fort.

Die Reaktionen auf Niedrigwasserereignisse unterscheiden sich je nach transportieren

Gütern und betroffenen Branchen (Hänsel et al. 2020). Wird weiterhin der Verkehrsträger Binnenschiff genutzt, können möglicherweise kleinere Transporteinheiten eingesetzt oder der Transport auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden. Sofern möglich kann aber auch eine Verlagerung des Transports auf andere Verkehrsträger wie die Bahn oder unter Umständen auch LKW erfolgen. Wie der Umgang mit einem Niedrigwasserereignis ausfällt, hängt daher von der Dauer der Transporteinschränkung, bestehenden Lagerkapazitäten und Verlagerungsmöglichkeiten ab (Hänsel et al. 2020).

Das Expertennetzwerk des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV-Expertennetzwerk, vormals BMVI-Expertennetzwerk) untersucht im Themenfeld 1 die Auswirkungen des Klimawandels auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen. In diesem Zusammenhang wurde eine exemplarische Klimawirkungsanalyse zu Niedrigwasser durchgeführt und Exposition, Sensitivität und Kritikalität betrachtet (Nilson et al. 2020). Besonders am Rhein als freifließendes Gewässer, mit einer steigenden Anzahl an Unterschreitungstagen des Schwellenwertes Gleichwertiger Wasserstand und hohen Transportmengen, wurde ein starkes Klimarisiko festgestellt. Des Weiteren wurden im Rahmen des Themenfeldes verkehrsträgerübergreifende Stresstestszenarien für die Region Mittelrhein untersucht (Hänsel et al. 2020). Dabei wurden mit dem Szenario Hochwasser und dem Szenario Niedrigwasser zwei Stresstestszenarien für Binnenwasserstraßen analysiert und deren verkehrliche Kosten abgeschätzt. Als Stresstestszenarien wurden zunächst unabhängig von der projizierten Klimaentwicklung besonders große mögliche Belastungen dargestellt.

Auf Basis dieser Studien wurden Annahmen zu den betroffenen Verkehrsaufkommen, Verkehrsverlagerungen und resultierenden verkehrlichen Kosten für die einzelnen betroffenen Gütergruppen für jeweils drei Klimaszenarien getroffen, die als Input der makroökonomischen Modellierung dienen. Die branchenspezifische Inputstruktur wird jeweils angepasst: Branchen, die Binnenschifffahrt als Vorleistung nachfragen, reduzieren diese Vorleistungsnachfrage und wechseln entweder (nicht kostenneutral) den Verkehrsträger, sodass vermehrt der Landverkehr zum Einsatz kommt, oder nutzen das Binnenschiff mit reduzierten Kapazitäten.

3.1.4.2 Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)

Deutschland ist eine große Industrienation und als solche auf den Import von Rohstoffen und Zwischenprodukten für die weitere Verarbeitung im Land angewiesen. Von knapp 180 Mrd. Euro im Jahr 2018 sind die Rohstoffimporte Deutschlands im Jahr 2020 auf knapp 140 Mrd. Euro zurückgegangen. Mit einem Anteil von 51 Prozent hatten Metalle den größten Anteil an den Rohstoffimporten, gefolgt von Energierohstoffen mit 47 Prozent und Nichtmetallen mit 2,3 Prozent (BGR 2021). Zwischenprodukte werden für die weitere Verarbeitung im verarbeitenden Gewerbe importiert.

Das Forschungsprojekt Impactchain (vgl. Peter et al. 2020) hat die Auswirkungen von Klimawandelfolgen im Ausland über den Welthandel auf Deutschland untersucht. Die Klimawandelfolgen außerhalb Europas wirken sich stärker aus, da die EU-Regionen im Vergleich zum Rest der Welt weniger stark von den Folgen des Klimawandels betroffen sind. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Deutschland insgesamt gegenüber dem

weltweiten Klimawandel exponiert ist.

Zu den hochvulnerablen Ländern, die hohe Exporte nach Deutschland tätigen, zählen Brasilien, Vietnam, Indien, Südafrika und Thailand, zu den besonders wichtigen Warengruppen zählen dabei landwirtschaftliche Produkte, Erze sowie Nahrungs- und Futtermittel (Brasilien), Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse (Vietnam und Thailand) und Zulieferungen für die deutsche Fahrzeug- und Maschinenindustrie (Südafrika) (Peter et al. 2019).

Für eine vollständige Abbildung der Klimawirkungen auf die Versorgung Deutschlands mit Rohstoffen und Zwischenprodukten bedarf es des Einsatzes eines internationalen Modellzusammenhangs sowie detaillierter Informationen zu den Klimawirkungen im Ausland. Ähnlich wie in Deutschland können Extremwetterereignisse wie Starkregen oder Sturm Produktionsanlagen oder Infrastruktur auch im Ausland beschädigen und so zu einer Verknappung des Angebots von Rohstoffen oder Zwischenprodukten auf den Weltmärkten führen. Unterbrochene Transportwege können sich ebenfalls negativ auf das Importvolumen Deutschlands auswirken und Produktionsprozesse in Deutschland zu einer Unterbrechung zwingen. Neben den Mengenproblemen kann es insbesondere auch zu Preisreaktionen kommen. Einer unveränderten Nachfrage steht auf dem Weltmarkt ein kleineres Angebot gegenüber, was unmittelbar zu höheren Preisen führt (Wolf et al. 2021).

Die Ableitung von zukünftigen Trends zur Versorgung Deutschlands mit Rohstoffen und Zwischenprodukten ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Gründe für diese Unsicherheit sind unterschiedliche politische und wirtschaftliche Entwicklungen in den Partnerländern, eine mögliche Änderung in der Länderstruktur bei den deutschen Handelspartnern in der Zukunft sowie zusätzliche klimaunabhängige Preisspekulationen bei Rohstoffpreisen (Wolf et al. 2021). Peter et al. (2020, S. 80) zeigen zudem, dass sich die wenigen Ergebnisse, die sich in der Literatur zu Handelsbeschränkungen durch globalen Klimawandel finden lassen, stark unterscheiden. Als Grund dafür nennen die Autoren Unterschiede bei Raum- und Zeitskalen, sowie die definierten Wirkungsketten, die eingesetzte Methodik und die getroffenen Annahmen.

Knittel et al. (2020) zeigen in einer Studie zu den Auswirkungen von globaler klimawandelbedingter Hitze auf den deutschen Außenhandel, dass sich insbesondere Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes mit geringeren Importen und Exporten konfrontiert sehen. Es wird daher unterstellt, dass es weltweit durch den Klimawandel zu Beeinträchtigungen in der Produktion von produzierenden Wirtschaftszweigen kommt. Die verringerten Produktionsmengen führen zu Preissteigerungen und geringeren Importmöglichkeiten für Deutschland. Durch die gesunkene Zahl an importierten Vorleistungsgütern können auch national weniger Produkte hergestellt werden, was sich nicht nur negativ auf das heimische Angebot auswirkt, sondern auch auf die Menge der Exportwaren. Insgesamt geht somit also auch der Export von Deutschland zurück.

Bei **starkem Klimawandel** wird unterstellt, dass sich infolge der globalen Klimafolgen die durchschnittlichen jährlichen Preissteigerungen von Importgütern der Branchen Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden, Textil- und Bekleidungsindustrie, Druckerzeugnisse, Chemie- und Pharmaindustrie, Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren, Glasindustrie, Metallindustrie, Herstellung von elektrischen Ausrüstungen,

Fahrzeug- und Möbelindustrie sowie Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen wieder ihrer jeweiligen durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate der letzten 20 Jahre annähern. Im Durchschnitt steigen die Importpreise dadurch um 1,1% p.a. und liegen damit 0,5 Prozentpunkte über der gemittelten durchschnittlichen jährlichen Preissteigerung des Basislaufs. Branchen des Verarbeitenden Gewerbes, bei denen im Basismodell bereits eine Steigerung des durchschnittlichen jährlichen Preisniveaus über das in der Vergangenheit zu beobachtende hinaus vorliegt, wurden nicht weiter angepasst. Hier wird davon ausgegangen, dass andere Faktoren wie struktureller Wandel oder globalpolitische Einflüsse eine stärkere Rolle spielen. Zusätzlich wird angenommen, dass die Exporte nicht auf dem ursprünglichen Niveau gehalten werden können, sondern sich bis 2050 langsam reduzieren. 2050 liegt die exportierte Menge 1,65% unter dem Basislauf.

Bei **schwachem Klimawandel** wird angenommen, dass die globalen Klimafolgen geringer ausfallen und dadurch die Preisanpassungen bei den Importen niedriger liegen als bei der starken Klimaentwicklung. Zudem reduziert sich die Zahl der betroffenen Branchen auf die Textil- und Bekleidungsindustrie, die Herstellung von Druckerzeugnissen, die Pharmaindustrie, die Glasindustrie, den sonstigen Fahrzeugbau sowie die Möbelindustrie. Das gemittelte durchschnittliche Wachstum der Importpreise der ausgewählten Wirtschaftszweige liegt bei 0,8% p.a. und damit um 0,5 Prozentpunkte höher als im Basislauf. Beim Export gelten dieselben Annahmen wie unter der pessimistischen Klimaentwicklung.

Das **mittlere Klimawandelszenario** befindet sich von den Einstellungen her direkt zwischen dem starken und schwachen Klimawandelszenario. Dabei sind dieselben Branchen wie unter der starken Klimaentwicklung betroffen.

3.1.5 AUSWIRKUNGEN AUF DAS GESUNDHEITSSYSTEM

Der Klimawandel hat mehrere direkte, aber auch indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und das Gesundheitssystem. Extremereignisse wie Hitze, Starkregen, Überschwemmungen oder Stürme haben direkte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, sie können zu Krankheit, Verletzungen oder Tod führen (COACC 2019). Extreme Wetterereignisse können auch indirekte Gesundheitsrisiken mit sich bringen, zum Beispiel durch den Zusammenbruch anderer kritischer Infrastrukturen wie der Stromversorgung (Birkmann et al. 2017).

Für die menschliche Gesundheit sind besonders steigende Temperaturen und Hitze von Bedeutung. Hitzebelastung führt zu zusätzlichen Todesfällen und zu einem Anstieg der Morbidität, einschließlich Hitzemüdigkeit, Hitzschlag oder Hitzestress und Dehydrierung, aber auch zur Verschlimmerung bestehender Gesundheitsprobleme wie Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Nierenprobleme (EEA 2020).

Die negativen gesundheitlichen Auswirkungen von Hitzewellen führen zu vermehrten Arztbesuchen, Krankenwageneinsätzen und Krankenhauseinweisungen und haben erhebliche Auswirkungen auf die Auslastung von Krankenwagen und Krankenhäusern (Campbell et al. 2018). Besonders gefährdet sind ältere Menschen und Kinder. Es ist davon auszugehen, dass dieses Risiko sowohl durch die steigenden Temperaturen und die zunehmende Anzahl, Intensität und Dauer von Hitzewellen als auch durch die

zunehmende Vulnerabilität aufgrund der demografischen Entwicklung zunehmen wird (Wolf et al. 2021).

Karlsson und Ziebarth (2018) schätzen die Gesundheitsausgaben für hitzebedingte Krankenhausaufenthalte auf 90.000 Euro bis 9,5 Millionen Euro pro zusätzlichem Hitzetag in Deutschland. Für ihre Studie haben sie die Daten von 170 Millionen Krankenhauseinweisungen mit Wetter- und Schadstoffdaten auf Kreisebene für die Jahre 1999 bis 2008 verschnitten und ausgewertet. Klauber und Koch (2021) haben auf Basis der Versicherungsdaten der AOK für den Zeitraum von 2008 bis 2018 ebenfalls untersucht, wie sich Heiße Tage auf die Hospitalisierungsrate der über 65-Jährigen auswirken und erhalten ähnliche, aber etwas niedrigere Effekte als Karlsson und Ziebarth (2018). Für das hohe Emissionsszenario wurde eine Steigerung der Anzahl der hitzebedingten Krankenhauskosten um 85 Prozent bis zum Jahr 2050 und um 488 Prozent bis zum Jahr 2100 ermittelt (Klauber & Koch 2021). Hübler et al. (2008) und Hübler (2014) schätzen die hitzebedingten Krankenhauskosten für die ferne Zukunft (2071-2100) auf 300 bis 700 Millionen Euro pro Jahr. Die Ergebnisse basieren auf Abschätzungen zusätzlicher Hitzetage auf Ebene der Bundesländer für das IPCC-Szenario A1B für den Zeitraum von 2071 bis 2100, dem Einfluss der Hitze auf Notaufnahmen in Krankenhäusern einschließlich der demographischen Entwicklung sowie den allgemeinen Krankenhauskosten (Hübler et al. 2008; Hübler 2014). Der Vergleich verschiedener Studien wird vor allem durch unterschiedliche Definitionen von Hitzeereignissen und die Betrachtung verschiedener Morbiditätsvariablen erschwert.

Der Deutsche Wetterdienst definiert einen Hitzetag bzw. Heißen Tag als einen Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur mindestens 30 °C beträgt (DWD 2022b). Eine Hitzewelle ist eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung, die Definitionen verwenden meist mindestens drei aufeinanderfolgende Hitzetage (DWD 2022a). Für die Zukunft wird eine steigende Anzahl Heißer Tage sowie eine steigende Frequenz, Intensität und Dauer von Hitzewellen für die meisten Gebiete in Deutschland erwartet (Deutsches Klima-Konsortium et al. 2021; Pfeifer et al. 2020). Das Ausmaß der Zunahme von Hitzetagen hängt von den zugrunde liegenden Klimaszenarien ab, Tabelle 3 gibt einen Überblick über jährliche Änderungen für drei Klimaszenarien jeweils für Mitte und Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode in Deutschland.

Tabelle 3: Bandbreite der projizierten jährlichen Änderungen der Heißen Tage in Tagen pro Jahr relativ zur Referenzperiode 1971-2000 für Deutschland

	Mitte des Jahrhunderts (2036-2065)	Ende des Jahrhunderts (2070-2099)
Starkes Klimaszenario (RCP8.5)	0 – 20	3 – 48
Mittleres Klimaszenario (RCP4.5)	0 – 15	1 – 18
Schwaches Klimaszenario (RCP2.6)	0 – 9	0 – 9

Quelle: eigene Darstellung, Daten aus Pfeifer et al. (2020)

Zur Quantifizierung Auswirkungen auf das Gesundheitssystem bzw. der hitzebedingten

Krankenhauskosten werden in dieser Studie analog zu den vorher genannten Analysen die Anzahl zusätzlicher Krankenhaustage pro Hitzetag, die durchschnittlichen Kosten eines Krankenhaustages sowie die für die Zukunft projizierten Heißen Tage pro Jahr für das jeweilige Klimawandelszenario basierend auf den Repräsentativen Konzentrationspfaden (RCPs) herangezogen. Dabei wird ebenfalls analog zu den vorher genannten Studien ein linearer Zusammenhang zwischen zusätzlichen Heißen Tagen und zusätzlichen Krankenhaustagen unterstellt.

Karlsson und Ziebarth (2018) haben für den Untersuchungszeitraum von 1999-2008 bis zu 19.000 zusätzliche Krankenhaustage pro Hitzetag ermittelt. Basierend auf den PANTA RHEI zugrunde liegenden Bevölkerungsprojektionen und der Annahme, dass vor allem Ältere ab 65 Jahren von hitzebedingten Krankenhauseinweisungen betroffen sind, ergibt sich für 2050 eine demografisch bedingte Steigerung der hitzebedingten Krankenhauseinweisungen um 60 Prozent. Hinsichtlich der ermittelten zusätzlichen Krankenhaustage ist folgendes anzumerken. Im betrachteten Untersuchungszeitraum sind kaum länger andauernde Hitzewellen in Deutschland aufgetreten, ein Anstieg der Anzahl und Intensität ist jedoch künftig zu erwarten. Die Effekte bei anhaltend hohen Temperaturen am Tag und in der Nacht könnten dann jedoch deutlich höher ausfallen (Bobb et al. 2014). Karlsson & Ziebarth (2018) führen in ihrer Untersuchung an, dass es Anzeichen dafür gibt, dass die kurzfristig negativen Auswirkungen mittelfristig möglicherweise weniger stark ausfallen könnten, da Menschen auch ohne das Hitzeereignis ins Krankenhaus eingeliefert worden wären. Künftig scheint auch ein gewisser Akklimatisierungseffekt an Hitze möglich, jedoch wird angenommen, dass dieser eher limitiert ist (WHO 2021).

Als durchschnittliche Kosten eines Krankenhaustages in Deutschland wurden die durchschnittlichen Kosten je Behandlungsfall durch die durchschnittliche Verweildauer geteilt und bis 2050 fortgeschrieben (Destatis 2021). Für die Entwicklung der Heißen Tage werden die Durchschnittswerte der projizierten Bandbreiten angenommen, sodass sich für das **starke Klimawandelszenario** 10, für das **mittlere Klimawandelszenario** 7,5 und für das **schwache Klimawandelszenario** 4,5 zusätzliche Heiße Tage für das Jahr 2050 angenommen werden.

Wolf et al. (2021) stellen fest, dass sich bisher nur wenige Studien mit den Folgen des Klimawandels auf das Gesundheitssystem befassen, sodass auch in der KWRA 2021 nur Wirkpfade skizziert werden. Mit steigenden Temperaturen können sich Krankheitserreger etablieren, die bisher nicht in Deutschland verbreitet waren (wie beispielsweise das West-Nil-Virus). Extremwetterereignisse wie Starkregen oder Sturm können ebenfalls zu mehr Krankheitsfällen oder der Überlastung von Krankenhäusern und Rettungststellen führen. Mit den hier betrachteten Kosten wird somit nur eine Untergrenze abgebildet.

3.2 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE FOLGEKOSTEN: SCHADENSSZENARIEN

Die in Kapitel 3.1 quantifizierten, also in ökonomische Wirkungen übersetzten, Klimawirkungen stellen nun den Input für die modellbasierte Abschätzung der volkswirtschaftlichen Folgekosten. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die gesamtwirtschaftlichen Effekte der jeweiligen Klimawirkungen einzeln betrachtet. Das Kapitel

schließt mit einer Gesamtbetrachtung der für diese Analyse ausgewählten Klimawirkungen. Betrachtet werden dabei nicht nur die Auswirkungen auf BIP und Beschäftigung, sondern auch auf die UN-Nachhaltigkeitsziele und Ungleichheit.

Die Wirkungskanäle im Modell sind vor allem nachfragegetrieben, d.h. ein Impuls durch Preissteigerungen setzt sich ausgehend von Nachfrageänderungen in der Produktion und dem Arbeitsmarkt fort. Generell löst eine Preissteigerung die folgenden Wirkungsketten im Modell aus: Durch einen Preisschock verringert sich die Endnachfrage, also der Konsum, die Investitionen sowie der Export. Die geringere Nachfrage löst eine Reduktion im Angebot aus, d.h. die Produktion passt sich an. Die Anpassung der Produktion erfolgt nicht nur in den Wirtschaftsbereichen, die direkt der Nachfrageänderung ausgesetzt sind, sondern setzt sich durch die Verflechtung über Vorleistungslieferungen auch in andere Wirtschaftsbereiche weiter fort. Neben den direkten Wirkungen ergeben sich somit auch immer indirekte Effekte. Das verringerte Angebot benötigt nicht nur einen geringeren Vorleistungseinsatz, sondern bewirkt auch eine Verringerung der Lohnkosten über weniger Arbeitseinsatz oder niedrigere Löhne. Eine weitere Wirkung betrifft Abschreibungen und Investitionen der Unternehmen. Daraus ergeben sich weitere Folgen für die Nachfrage: Die Stückkosten können sich reduzieren, was zu einer Anpassung der Preise und Stabilisierung der Nachfrage führt. Daneben bewirken Einkommensausfälle bei den privaten Haushalten durch Arbeitslosigkeit oder Lohnreduktion weitere negative Nachfrageimpulse. Auch ausbleibende Investitionen als Teil der Endnachfrage reduziert die Nachfrage weiter.

Der Unterschied zwischen dem Verlauf mit Schock zu dem ohne Schock zeigt dann die Wirkung des Schocks auf, d.h. die entstehenden Verluste bzw. Gewinne. Im Zentrum dieser Studie stehen die Kosten, die durch klimawandelbedingte Schocks bzw. Änderungen entstehen. Die Kosten entsprechen dabei den Verlusten gegenüber dem Ausgangslauf bzw. der Referenz und werden negativ dargestellt. Am Beispiel des Bruttoinlandsprodukts stellen die Kosten der Klimawandelfolgen also dar, um wieviel Euro bzw. Prozent sich das BIP reduziert hat.

3.2.1 ERTRAGSAUSFÄLLE IN DER LANDWIRTSCHAFT

Die weltweiten Ertragsausfälle und die damit zusammenhängenden angenommenen Preissteigerungen haben eindeutig negative Wirkungen auf die nationale wirtschaftliche Entwicklung mit Kosten, die sich abhängig von der Stärke des Klimawandels auf 110 bis zu ca. 160 Mrd. Euro im Jahr 2050 aufsummieren (s. umrandete Balken in Abbildung 8). Der höchste Kostenfaktor sind dabei die Einbußen im Export: Die steigenden Preise nicht nur der Importe, sondern auch der nationalen Landwirtschaftserzeugnisse erhöhen die Produktionskosten zahlreicher Wirtschaftszweige, welche diese als Vorprodukte einsetzen, und reduzieren ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit. Dadurch fallen die Exporte aufsummiert über den Zeitraum 2022 bis 2050 um gut 60 Mrd. Euro bis zu 130 Mrd. Euro niedriger aus.

Auch der Wegfall des Privatkonsums trägt maßgeblich zu den Folgekosten bei. Durch verteuerte Lebensmittel und geringere Beschäftigung (s. Abbildung 9) fällt der Konsum infolge der oben beschriebenen Wirkungszusammenhänge (s. Abschnitt 3.2) deutlich niedriger aus als im Basislauf. Kumuliert belaufen sich die Kosten aus dem

Konsumverlust zwischen gut 50 Mrd. Euro und fast 110 Mrd. Euro.

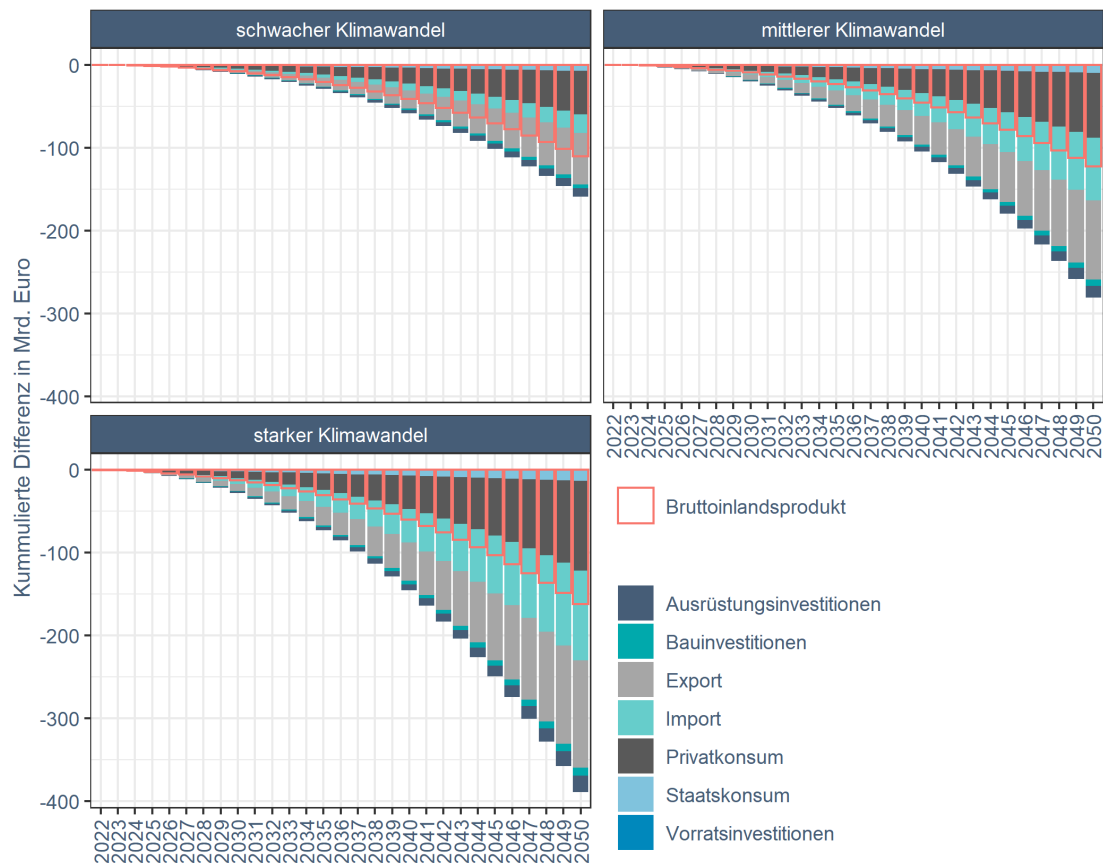
Die kumulierten Kosten für alle Sektoren sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Landwirtschaft in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050

	schwach	mittel	stark
Bruttoinlandsprodukt	-110	-120	-160
Privatkonsum	-50	-80	-110
Staatskonsum	-10	-10	-10
Ausrüstungsinvestitionen	-10	-10	-20
Bauinvestitionen	-0	-10	-10
Vorratsinvestitionen	0	0	0
Export	-60	-100	-130
Import	-20	-80	-110

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 8: Volkswirtschaftliche Folgen durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Landwirtschaft – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

In Abbildung 9 sind die Folgen der klimawandelbedingten Ertragsausfälle in der Landwirtschaft für den Arbeitsmarkt dargestellt. In allen drei Klimaszenarien ist die Gesamtzahl der Erwerbstätigen niedriger als im Basisverlauf: 2050 sind in Summe zwischen 17.000 und 45.000 Personen weniger erwerbstätig. Die stärksten Rückgänge treten in der Nahrungsmittelindustrie und dem Gastgewerbe auf. Daneben gibt es auch Branchen, die eine positive Abweichung zum Basisverlauf aufweisen: im Gesundheitswesen, dem Einzelhandel und in der Landwirtschaft werden durch die Folgekosten durch Ertragsausfälle in der Landwirtschaft mehr Erwerbstätige eingesetzt. Ursächlich hierfür sind niedrige Löhne in den jeweiligen Branchen. Vor allem in der Landwirtschaft werden Investitionen in Ausrüstungen und Maschinen durch zusätzliche Arbeitskräfte ersetzt. Es kommt auf den Arbeitsmarkt also auch zu einer bedarfsseitigen strukturellen Verschiebung hin zu Beschäftigungen mit geringerer Bezahlung.

Abbildung 9: Arbeitsmarktfolgen der klimawandelbedingten Ertragsausfälle in der Landwirtschaft – Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen nach Wirtschaftsbereichen in Tsd. Personen, 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

3.2.2 FORSTWIRTSCHAFT

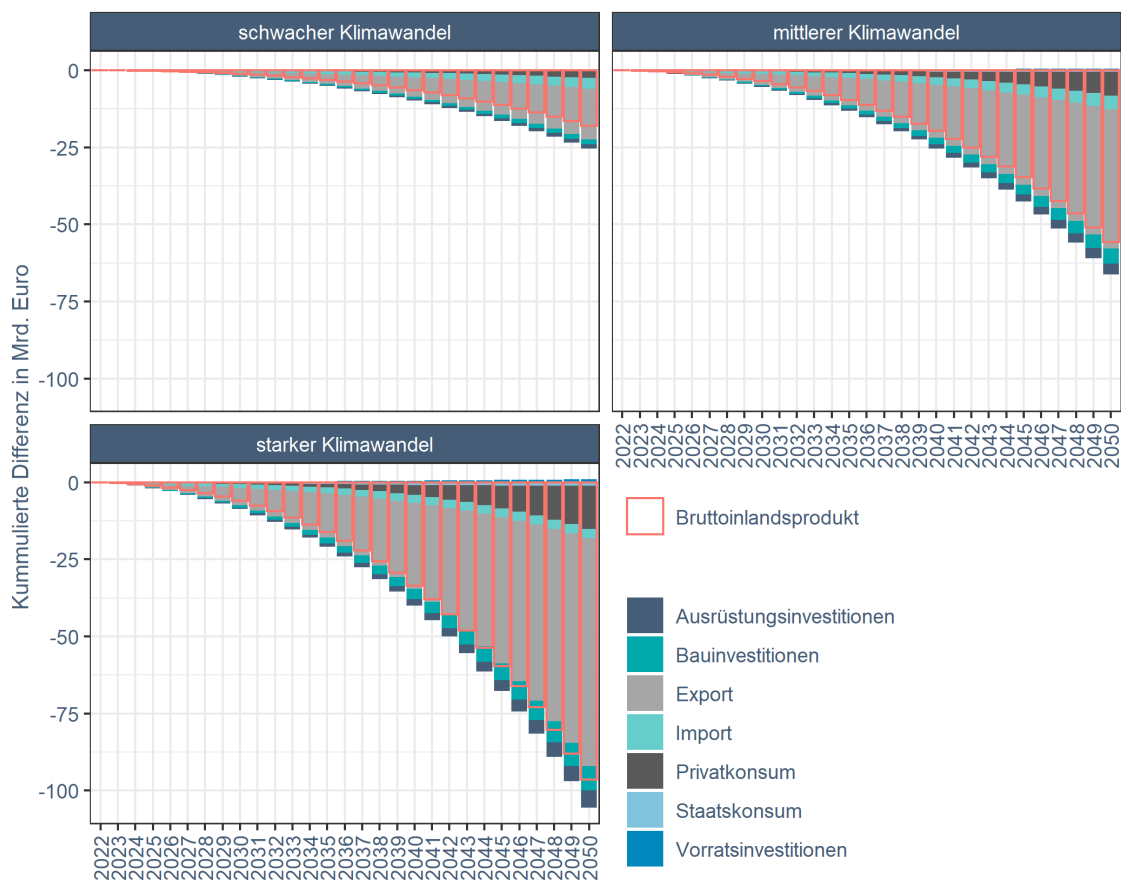
Die hier ebenfalls global angestoßenen Klimafolgen für die Forstwirtschaft, die sich in Preissteigerungen bei Importpreisen und heimischen Preisen äußern, resultieren in Kosten, die sich abhängig von der Stärke des Klimawandels auf knapp 20 bis zu ca. 100 Mrd. Euro im Jahr 2050 aufsummieren (s. umrandete Balken in Abbildung 10). Der höchste Beitrag zu den Klimafolgekosten im Bereich Forstwirtschaft entfällt auf den Export: Die steigenden Preise nicht nur der Importe, sondern auch der nationalen Landwirtschaftspreise erhöhen die Produktionskosten zahlreicher Wirtschaftszweige und reduzieren ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit. Dadurch fallen die Exporte aufsummiert über den Zeitraum 2022 bis 2050 um gut 15 Mrd. Euro bis zu knapp 75 Mrd. Euro niedriger aus. Die kumulierten Kosten für alle Sektoren sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050

	schwach	mittel	stark
Bruttoinlandsprodukt	-20	-60	-100
Privatkonsum	-0	-10	-10
Staatskonsum	0	-0	-0
Ausrüstungsinvestitionen	-0	-0	-10
Bauinvestitionen	-0	-10	-10
Vorratsinvestitionen	0	0	0
Export	-20	-50	-70
Import	-0	-0	-0

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 10: Volkswirtschaftliche Folgen durch klimawandelbedingte Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Die erhöhten Produktionskosten haben einen negativen Effekt auf die reale Produktion: Im Jahr 2050 fällt die Produktion real zwischen 3 Mrd. Euro und 13 Mrd. Euro niedriger aus als im Basisverlauf. Insgesamt belaufen sich die klimawandelbedingten Verluste durch in der Forstwirtschaft ausgelöste Klimawandelfolgen kumuliert auf gut 40 Mrd. Euro bis 180 Mrd. Euro. Differenziert nach Wirtschaftszweigen ist kein einziger davon positiv betroffen, sondern alle produzieren real weniger (s. Abbildung 11). Besonders hoch fallen die absoluten Abweichungen im originären Wirtschaftsbereich Forstwirtschaft, aber auch in den nachgelagerten und eng damit verbundenen Branchen der Herstellung von Holzwaren und der Möbelindustrie aus. Auffällig ist auch, dass die Klimawandelkosten über die Jahre stärker werden, d.h. dass sich die Abweichungen vom Basisverlauf 2050 gegenüber 2030 fast verdreifachen.

Abbildung 11: Folgen der klimawandelbedingten Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft für die Produktionsstruktur – Wirkungen auf die reale Produktion nach Wirtschaftsbereichen in Mrd. Euro, 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

3.2.3 SCHÄDEN AN GEBÄUDEN UND INFRASTRUKTUR

Versicherungsleistungen

Die Rückstellungen bei den Versicherungen für erwartete zukünftige Klimafolgeschäden und die damit verbundenen Preissteigerungen in der Versicherung wirken sich zum einen auf die Haushalte aus, die Versicherungsdienstleistungen nachfragen, sowie zum anderen auch auf diejenigen Branchen, die Versicherungsdienstleistungen als Vorleistung beziehen. Die volkswirtschaftlichen Folgen äußern sich in verschiedenen Wirkungskanälen: Die privaten Haushalte reagieren mit einer Anpassung in der Nachfragestruktur, d.h. sparen bei anderen Konsumverwendungszwecken, oder, wenn sie ihr Konsumverhalten nicht ändern möchten, mit einer verringerten Sparrate oder sogar mit dem Auflösen von Ersparnissen. Unternehmen preisen die erhöhten Kosten für Versicherungen ein und geben diese damit anteilig oder vollständig an ihre Kunden weiter, welche aus anderen Unternehmen oder wiederum privaten Haushalten bestehen können. Es kommt also nicht nur zu Preissteigerungen in der Versicherungsbranche, sondern auch in vielen weiteren Branchen, welche Versicherungsdienstleistungen nachfragen, mit ähnlichen Nachfragereaktionen bei den Haushalten. Es stellen sich somit verschiedene Konsumreaktionen auf die gestiegenen Preise ein, welche wiederum zu vielfältigen Anpassungsreaktionen in der Ökonomie führen.

Rückstellungen Wohnungswesen und Mietpreissteigerungen

Die über Mietpreissteigerungen gebildeten Rücklagen im Wohnungswesen wirken sich auf die privaten Haushalte, aber auch den Unternehmenssektor aus. Daneben ergeben sich weitere Preiseffekte bei Mieten durch die Verknappung von Wohnraum und Gewerbefläche infolge von Schäden an Gebäuden sowie das Weiterreichen erhöhter Ausgaben für Versicherungsdienstleistungen der Vermieter:innen an die Mieter:innen. Auf Seiten der privaten Haushalte können die Wohnausgaben nicht einfach substituiert werden, sondern erfüllen einen wesentlichen Zweck des täglichen Lebens. Im Jahr 2020 hatten die Ausgaben für Wohnen, Energie und Wohnungsinstandhaltung mit 37 % zudem einen bedeutenden Anteil an den privaten Konsumausgaben (Destatis 2022). Dementsprechend führen die Mietpreissteigerungen dazu, dass die Haushalte andere Konsumausgaben reduzieren, die Sparquote reduzieren, Ersparnisse auflösen oder schlimmstenfalls Kredite für Investitionen aufnehmen müssen. Insgesamt wirkt sich die Konsumzurückhaltung bzw. -änderung negativ auf die Gesamtwirtschaft aus. Auf Seiten der Unternehmen resultieren die Mietpreissteigerungen in höheren Produktionskosten, die eingepreist werden müssen. Daneben führen die erhöhten Rückstellungen im Wohnungswesen dazu, dass weniger Mittel für Investitionen in neue Bauten frei sind, was sich negativ auf andere Wirtschaftszweige wie dem Baugewerbe auswirkt. Insgesamt führen beide Effekte auf Unternehmensseite über die Verflechtung der Wirtschaftszweige untereinander dazu, dass sich die Produktions- und Wirtschaftsleistung verringert. In Abbildung 12 wird deutlich, dass die beschriebenen Effekte im Jahr 2050 die höchsten Kosten verursachen.

Konsumverzicht und erhöhte Sparquote

Der Konsumverzicht der privaten Haushalte sorgt dafür, dass Geld, welches eigentlich im Wirtschaftskreislauf für Konsumzwecke eingesetzt wird, zurückgehalten wird und stattdessen gespart wird. Die geringere Nachfrage nach Konsumgütern wirkt sich unmittelbar auf die Produktion in der Volkswirtschaft aus. Die durch die geringere Nachfrage niedrigere Produktion eines Sektors führt über die Vorleistungsverflechtungen dieses Sektors zu weiteren Nachfragerückgängen in den übrigen Sektoren. Eine niedrigere Produktion wirkt sich wiederum negativ auf die Beschäftigung aus, welche wiederum negative Wirkungen auf Lohn und damit Konsum hat. Insgesamt zeigt sich in Abbildung 12, dass dieser Effekt für 2030 die größten volkswirtschaftlichen Kosten verursacht.

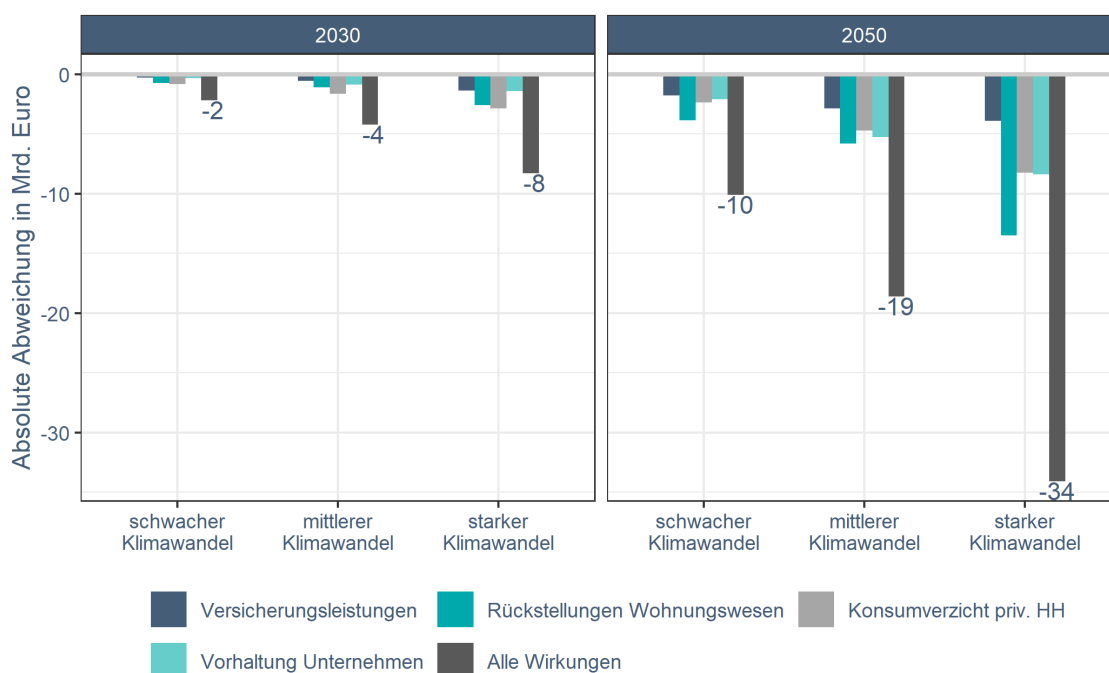
Vorhaltung von Unternehmen

Der Aufbau einer Rücklage durch Unternehmen ähnelt dem Vorgehen einer erhöhten Sparaktivität bei privaten Haushalten. Eine Möglichkeit der Unternehmen ist es, die Preise für ihre Produkte anzuheben, um so die Rücklagen für die Beseitigung und Reparatur von möglichen Schäden durch Extremwetterereignisse an Gebäuden bilden zu können. Steigende Preise wirken unmittelbar negativ auf die Nachfrage, sowohl aus dem In- als auch aus dem Ausland. In der Folge kommt es abermals zu einer Reaktion auf die Produktion und somit auf die ökonomische Aktivität der Volkswirtschaft. Eine andere Möglichkeit ist, Investitionen in neue Ausrüstungen und Bauten zurückzustellen oder nicht durchzuführen, was sich ebenfalls in einer geringeren Nachfrage ausdrückt und damit negativ auf die Produktion wirkt.

Abbildung 12 verdeutlicht die sich jeweils einstellenden makroökonomischen Effekte für die genannten volkswirtschaftlichen Folgen durch Schäden an Gebäuden durch Extremwetterereignisse für die Jahre 2030 und 2050 auf das reale BIP.

Insgesamt ergeben sich im Jahr 2030 bei starkem Klimawandel Folgekosten durch Schäden an Gebäuden gemessen an der Veränderung des BIP in Höhe von 8 Mrd. Euro, bei schwachem Klimawandel sind es 2 Mrd. Euro. Besonders die Rückstellungen beim Wohnungswesen sowie der Konsumverzicht der privaten Haushalte verursachen die größten Folgekosten. Durch die sich im Zeitablauf intensivierenden Klimawirkungen führen die Annahmen aus Abschnitt 3.1.3.4 dazu, dass die volkswirtschaftlichen Folgen bis 2050 nicht linear ansteigen, sondern überproportional größer ausfallen. Bei starkem Klimawandel liegt das reale BIP um über 34 Mrd. Euro niedriger und bei schwachem Klimawandel um über 10 Mrd. Euro. Relativ betrachtet fällt das BIP im Vergleich zu einer Entwicklung ohne voranschreitenden Klimawandel im Jahr 2050 um 0,3 % und 0,9 % geringer aus.

Abbildung 12: Volkswirtschaftliche Folgen durch Schäden an Gebäuden durch Extremwetterereignisse – Wirkungen auf das reale BIP in Mrd. Euro in den Jahren 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Tabelle 6 kumuliert die in Abbildung 12 nur für zwei Jahre dargestellten Wirkungen auf das BIP für die Jahre 2022 bis 2050. Bei unterstelltem starkem Klimawandel summiert sich der Effekt auf das BIP auf 470 Mrd. Euro auf, bei schwachem Klimawandel sind es 130 Mrd. Euro. Es sei betont, dass es sich dabei nicht um monetarisierte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur direkt handelt, sondern um mögliche Folgewirkungen, die sich durch Vorsicht und Vorsorge bei Haushalten und Unternehmen einstellen können.

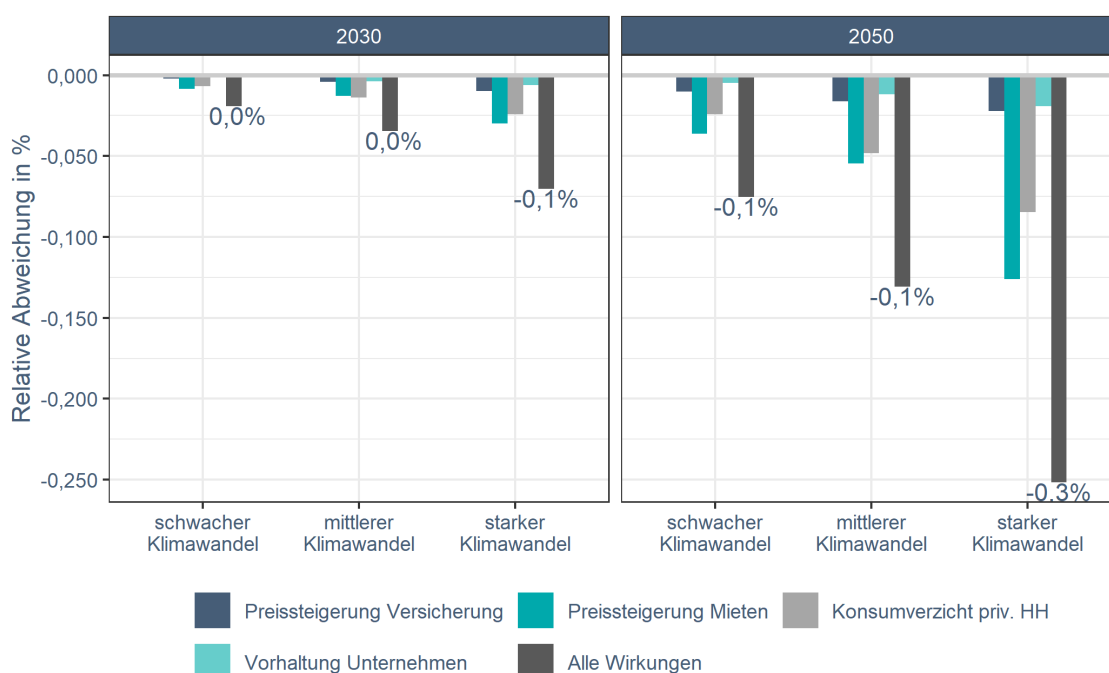
Tabelle 6: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Schäden an Gebäuden und Infrastruktur in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050

	schwach	mittel	stark
Bruttoinlandsprodukt	-130	-250	-470
Privatkonsum	-140	-260	-480
Staatskonsum	-0	-0	-0
Ausrüstungsinvestitionen	-20	-30	-60
Bauinvestitionen	-10	-10	-30
Vorratsinvestitionen	-0	-0	-0
Export	-10	-30	-50
Import	-50	-80	-160

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Die Arbeitsmarktwirkungen sind ebenfalls negativ (siehe Abbildung 13).

Abbildung 13: Volkswirtschaftliche Folgen durch Schäden an Gebäuden durch Extremwetterereignisse – Wirkungen auf die Erwerbstätigen in Prozent in den Jahren 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Im Jahr 2030 sind im Fall von starkem Klimawandel gut 30.000 Personen weniger erwerbstätig als unter Bedingungen ohne voranschreitenden Klimawandel. Die Erwerbstätigkeit liegt also um bis zu 0,1% niedriger. Für 2050 verdreifacht sich diese Abweichung: Die Zahl der Erwerbstätigen fällt bei starkem Klimawandel um 0,3% niedriger aus.

als in der Referenz ohne voranschreitenden Klimawandel, was fast 110.000 Personen entspricht. Der geringere Bedarf an Erwerbstätigen lässt sich vor allem auf die Effekte aus den Rückstellungen im Wohnungswesen und die Mietpreissteigerungen sowie aus dem Konsumverzicht der privaten Haushalte zurückführen.

3.2.4 BINNENSCHIFFFAHRT UND WARENVERKEHR

3.2.4.1 Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Niedrigwasser)

Durch Niedrigwasser ausgelöste Beeinträchtigungen der Binnenschiffahrt können zu einer Reduzierung der Transportkapazitäten führen, die in Steigerungen der Transportkosten oder Verlagerungen auf den Landverkehr resultieren. Je nach unterstellten Klimaentwicklung ergeben sich bis 2050 kumulierte Folgekosten von 2 bis 4 Mrd. Euro (siehe Tabelle 7 und Abbildung 14). Die Effekte ergeben sich vor allem aus einem Rückgang des Privatkonsums sowie der Exporte und einer Steigerung der Importe.

Tabelle 7: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtstraßen durch Niedrigwasser in Mrd. Euro, 2050

	schwach	mittel	stark
Bruttoinlandsprodukt	-3	-4	-4
Privatkonsum	-0	-1	-2
Staatskonsum	-0	-0	-0
Ausrüstungsinvestitionen	0	0	0
Bauinvestitionen	-0	-0	-0
Vorratsinvestitionen	0	0	0
Export	-1	-1	-1
Import	1	1	1

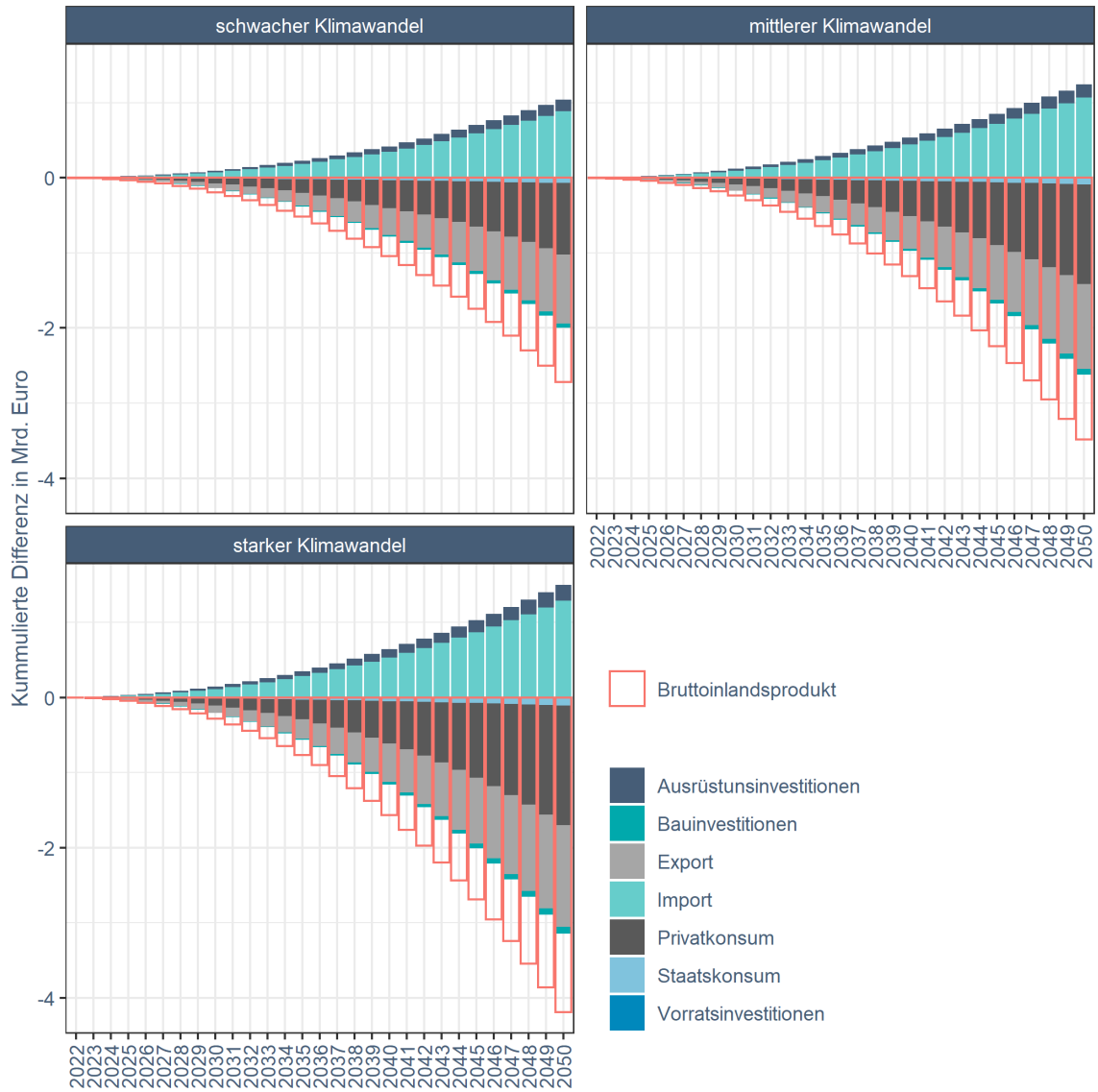
Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Es ergibt sich zudem ein leicht negativer Effekte auf die reale Produktion, wobei sich insbesondere eine Veränderung der Wirtschaftsstruktur ergibt. Abbildung 15 zeigt die niedrigwasserbedingten Effekte auf die Produktionsstruktur. Positive Effekte ergeben sich durch die Verlagerung des Transports vor allem für den Landverkehr und Lagerei, während die absoluten Abweichungen für die Schifffahrt und die damit eng verbundenen Wirtschaftszweige wie die Nahrungsmittelindustrie, die Chemieindustrie und Landwirtschaft besonders negativ ausfallen.

Die Klimaprojektionen deuten darauf hin, dass Niedrigwasserereignisse erst ab der Mitte bis zum Ende des Jahrhunderts häufiger und intensiver werden (Nilson et al. 2020). Bis zum Jahr 2050 kann also unterstellt werden, dass sich eher moderate Effekten ergeben werden. Darüber hinaus werden hier durchschnittliche jährliche Effekte ausgewiesen, während sich in Jahren mit langanhaltenden Niedrigwasserereignissen deutlich stärkere Effekte ergeben können, insbesondere wenn nicht ausreichend Transport- und

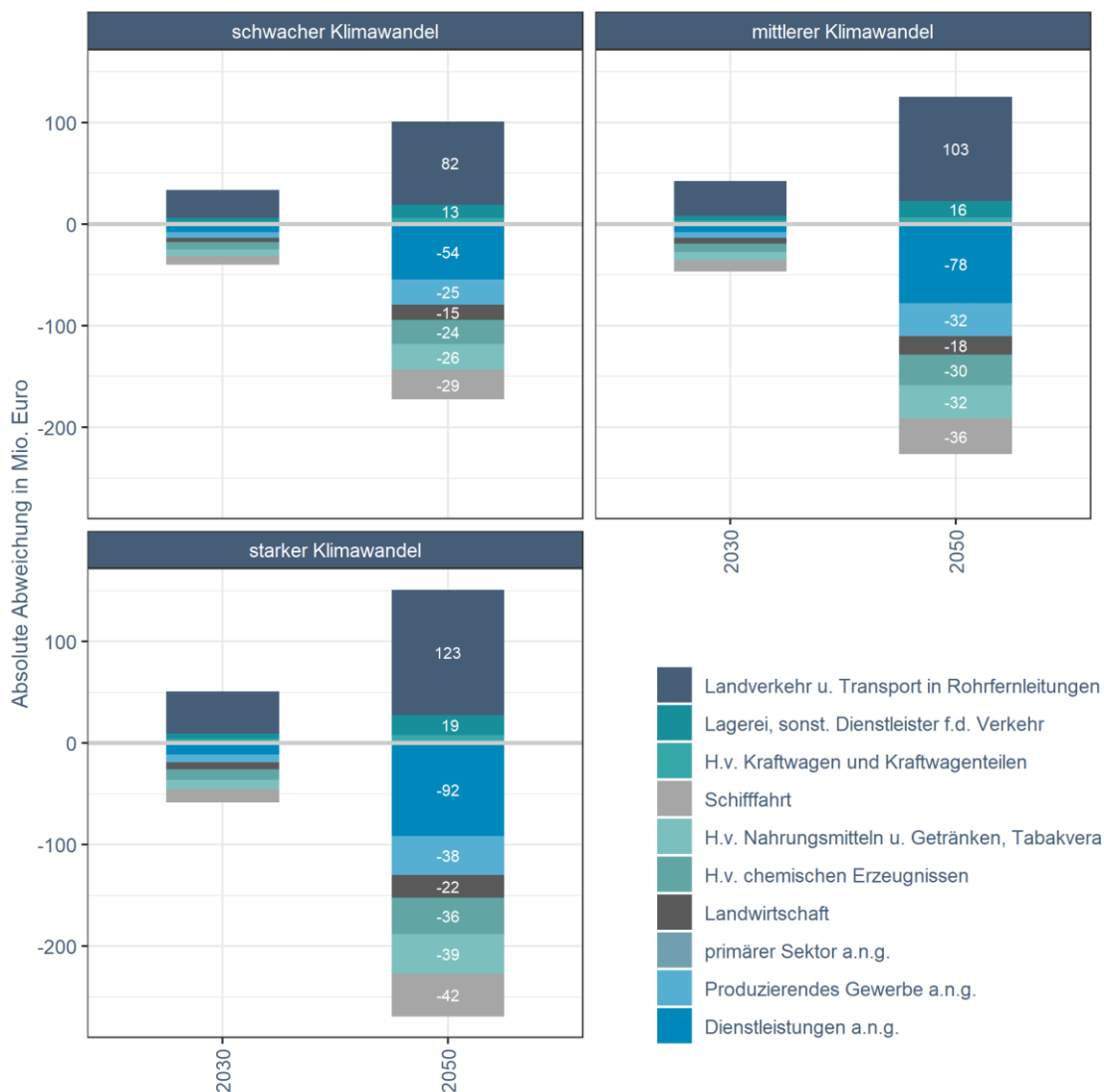
Umschlagskapazitäten oder Fahrzeugführer zur Verfügung stehen.

Abbildung 14: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen durch Niedrigwasser – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 15: Auswirkungen von klimawandelbedingten Beeinträchtigungen der Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen durch Niedrigwasser für die Produktionsstruktur – Wirkungen auf die reale Produktion nach Wirtschaftsbereichen in Mio. Euro, 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

3.2.4.2 Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)

Die hier auftretenden Wirkungsketten folgen durch die ähnliche Systematik in der Szenarien-Einstellung weitestgehend denen unter Abschnitt 3.1.1. Die klimawandelbedingten Behinderungen und Einschränkungen im internationalen Handel und die damit verbundenen Steigerungen der Weltmarktpreise haben eindeutig negative Wirkungen auf die nationale wirtschaftliche Entwicklung. Abhängig von der Stärke des Klimawandels reduziert sich das BIP über den gesamten Zeitraum 2022 bis 2050 um insgesamt knapp 20 bis fast 200 Mrd. Euro (s. umrandete Balken in Abbildung 16). Deutlich wird in Abbildung 16 auch, dass die Wirkungen innerhalb der BIP-Komponenten deutlich höher ausfallen: Der Export reduziert sich aufsummiert über den Zeitraum 2022 bis 2050 um ca. 740 bis 1.560 Mrd. Euro. Gleichzeitig fallen die Importe um 850 bis 1.740 Mrd. Euro

niedriger aus. In der Summe führt dies zu den vergleichsweise geringeren Abweichungen im BIP, bedeutet aber substantielle Umstrukturierungen im Welthandel und in der Erwirtschaftung des Bruttoinlandsprodukts. Auch die Wirkung auf den privaten Konsum ist nicht zu vernachlässigen. Die Preissteigerungen werden zum Teil an die Konsumentinnen und Konsumenten weitergereicht, was zu einer teilweisen Reduktion im Konsum führt. Insgesamt gut 90 bis fast 300 Mrd. Euro werden über den gesamten Zeitraum bis 2050 weniger für den Konsum verausgabt. Die kumulierten Kosten für alle Sektoren sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

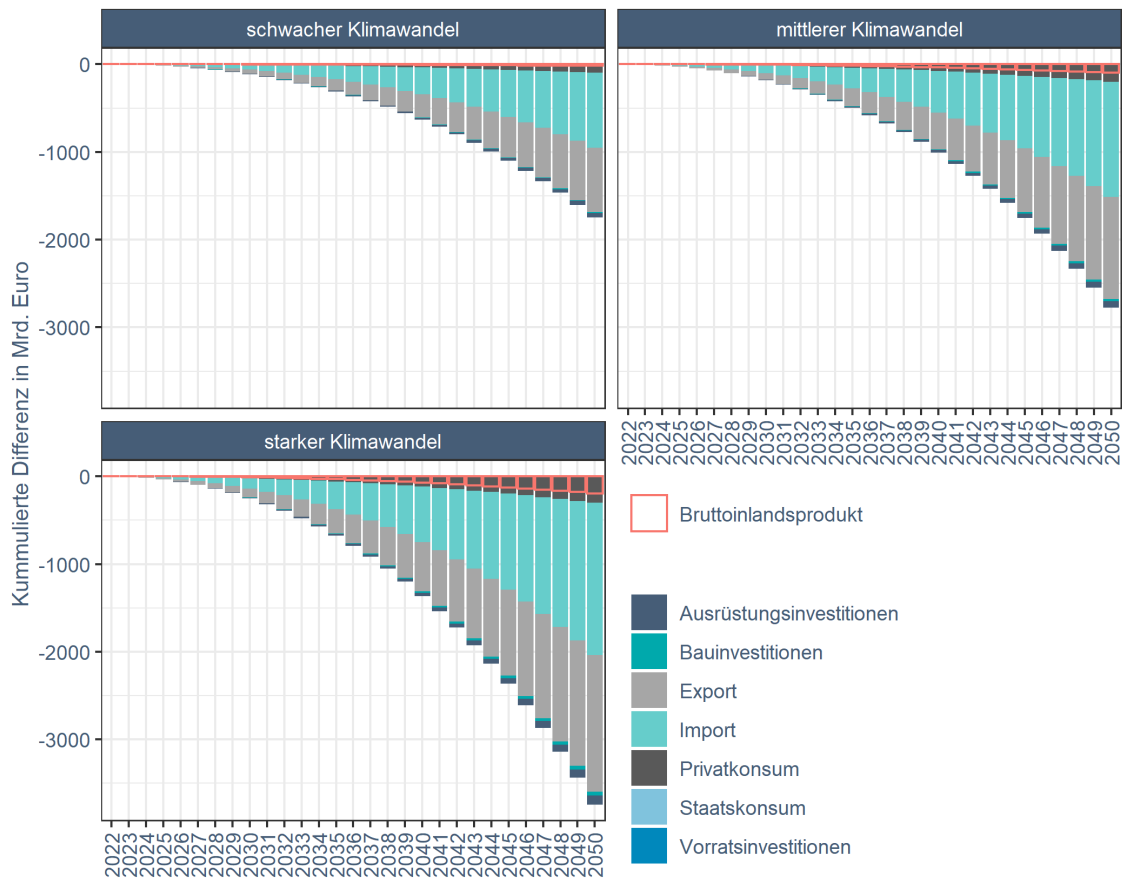
Die Ergebnisse für das BIP für das Jahr 2050 decken sich mit den Befunden von Peter et al. (2020): Sie weisen aufgrund von Handelsbeschränkungen infolge des globalen Klimawandels Einbußen beim BIP für Deutschland in Höhe von 0,01% bis 0,35% aus. In den hier vorliegenden Szenario-Rechnungen ergeben sich prozentuale Abweichungen für das Jahr 2050 in Höhe von -0,02% für das schwache, -0,17% für das mittlere und -0,36% für das starke Klimawandel-Szenario.

Tabelle 8: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen des internationalen Handels in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050

	schwach	mittel	stark
Bruttoinlandsprodukt	-20	-100	-190
Privatkonsum	-90	-190	-290
Staatskonsum	-0	-10	-10
Ausrüstungsinvestitionen	-50	-80	-100
Bauinvestitionen	-10	-30	-40
Vorratsinvestitionen	-0	0	1
Export	-740	-1160	-1560
Import	-850	-1320	-1740

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 16: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch klimawandelbedingte Beeinträchtigungen des internationalen Handels – kumulierte Wirkungen auf das reale BIP und seine Komponenten in Mrd. Euro, 2022 – 2050

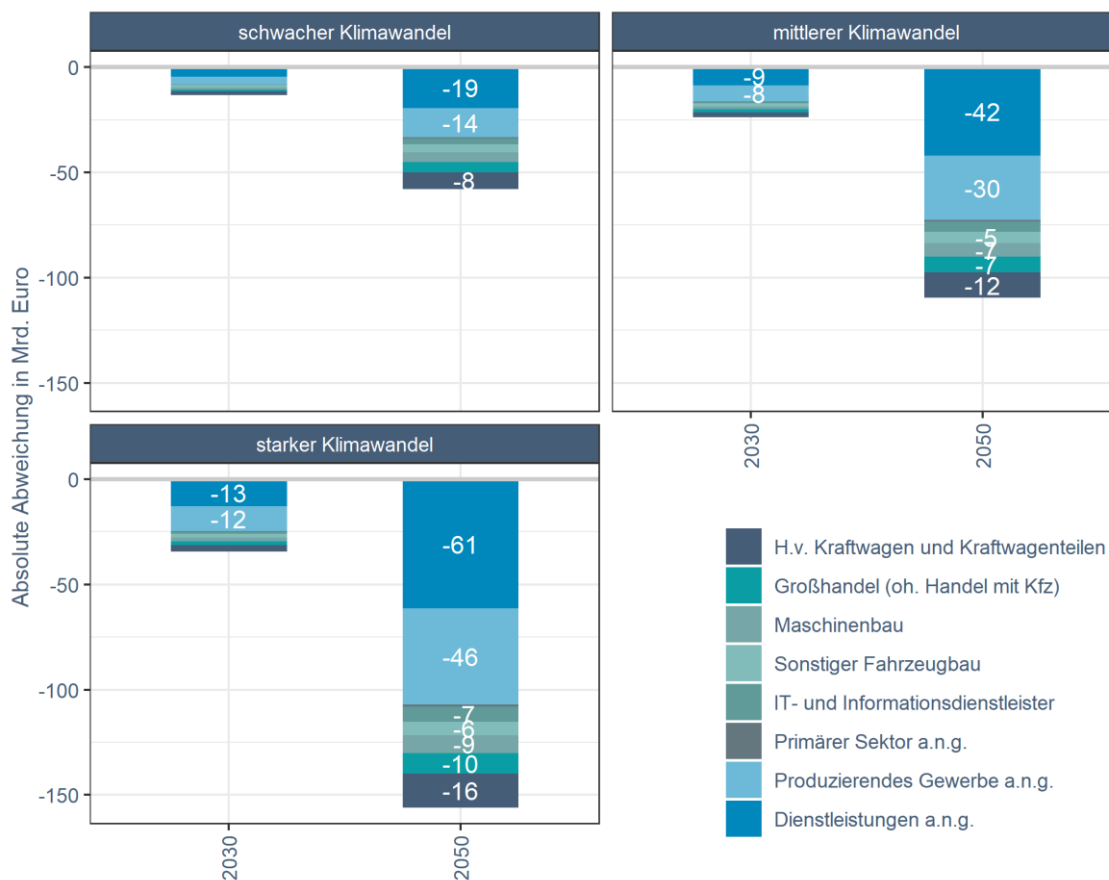


Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Die Strukturveränderungen zeigen sich auch in der Produktion bei den Wirtschaftsbereichen. Insbesondere die exportorientierten Branchen verlieren durch die Klimawandelfolgen real an Produktion.

Im Jahr 2050 fällt die Produktion unter den gegebenen Annahmen und in Abhängigkeit der bestehenden Unsicherheiten real zwischen 60 Mrd. Euro und knapp 160 Mrd. Euro niedriger aus als im Basisverlauf. Insgesamt belaufen sich die klimawandelbedingten Verluste durch Beeinträchtigung des internationalen Handels kumuliert auf 790 Mrd. Euro bis mehr als 2.000 Mrd. Euro. Differenziert nach Wirtschaftszweigen ist nach den Ergebnissen der Modellrechnung kein einziger davon positiv betroffen, sondern alle produzieren real weniger (s. Abbildung 17). Besonders hoch fallen die absoluten Abweichungen in den Exportbranchen bzw. den handelsorientierten Branchen Fahrzeugbau, Großhandel und Maschinenbau aus. Die Klimakosten verstärken sich zudem über die Jahre: Die Abweichungen vom Basisverlauf sind 2050 mehr als dreimal so hoch wie 2030.

Abbildung 17: Folgen der klimawandelbedingten Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs für die Produktionsstruktur – Wirkungen auf die reale Produktion nach Wirtschaftsbereichen in Mrd. Euro, 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

3.2.5 GESUNDHEITSSYSTEM

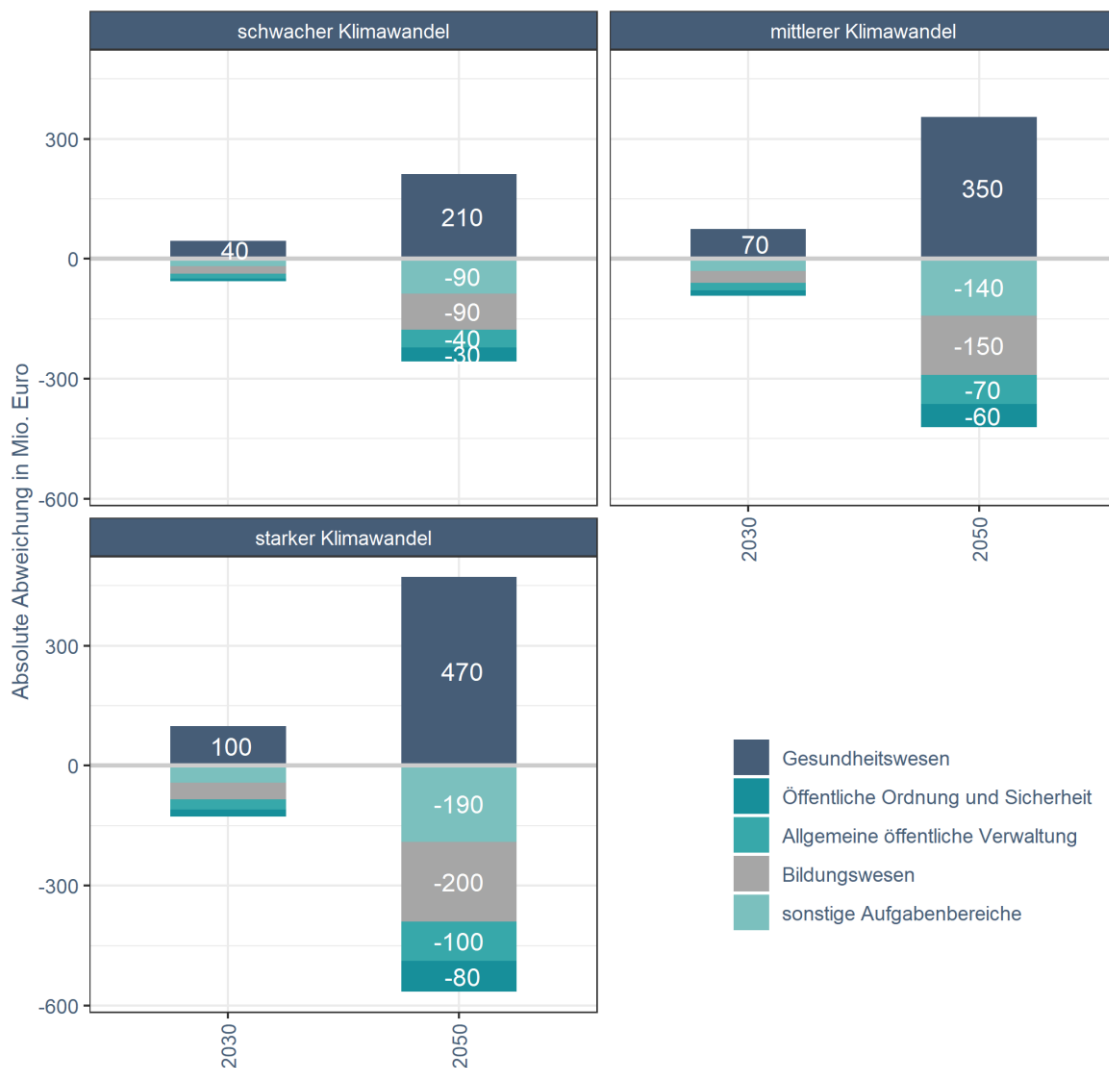
Eine Zunahme von hitzebedingten Krankenhauseinweisungen führt zu steigenden Krankheitskosten und erhöhten Staatsausgaben im Aufgabenbereich Gesundheitssystem, was sich bei einem gleichbleibenden Finanzierungssaldo auf die übrigen Ausgabenbereiche des Staates auswirkt. Abbildung 18 zeigt die Veränderungen der Staatsausgaben nach Aufgabenbereichen durch die Erhöhung der Krankheitskosten durch hitzebedingte Krankenhauseinweisungen für die Jahre 2030 und 2050 für jeweils drei Klimaentwicklungen.

Für das Jahr 2030 ergeben sich jeweils moderate Erhöhungen der Gesundheitsausgaben zwischen 44 und 99 Mio. Euro und jeweils moderaten Rückgängen in den übrigen Aufgabenbereichen. Für das Jahr 2050 ergeben sich bereits Erhöhungen der Gesundheitsausgaben zwischen 210 und 470 Mio. Euro. Die Entwicklung der hitzebedingten Krankenhausaufenthalte hängt insbesondere von den künftig zu erwartenden Hitzeereignissen ab. Bis zur Mitte des Jahrhunderts verläuft die Zunahme der Heißen Tage noch vergleichsweise moderat und die Bandbreiten der Klimaprojektionen überlagern sich noch recht stark, entwickeln sich im weiteren Verlauf jedoch zunehmend auseinander. Während die Anzahl der zusätzlichen Heißen Tage im schwachen Emissionsszenario nicht weiter zunimmt, werden für das starke Emissionsszenario bis zu 48

zusätzliche Heiße Tage projiziert (siehe Tabelle 3 oder Pfeifer et al. (2020)).

Es ist zu beachten, dass die durchschnittlichen jährlichen Erhöhungen relativ gering ausfallen, länger anhaltende Hitzewellen mit anhaltend hohen Temperaturen tagsüber und nachts in den jeweils auftretenden Jahren jedoch deutlichere Effekte hervorrufen. Des Weiteren wurden hitzebedingte Todesfälle sowie die durch hitzebedingte Krankheiten ausgelöste verminderte Lebensqualität oder der Verlust von Lebensjahren hier nicht monetär bewertet. Zudem ergeben sich weitere klimawandelbedingte Auswirkungen auf das Gesundheitssystem wie beispielsweise durch die Ausbreitung in Deutschland bisher nicht verbreiteter Krankheitserreger. Ebenfalls nicht betrachtet wurden Erkrankungen, Verletzungen und Todesfälle aus weiteren Extremereignissen wie Starkregen oder Hochwasser. Die hier ermittelten Auswirkungen stellen somit nur eine Untergrenze der klimawandelbedingten Auswirkungen auf das Gesundheitssystem dar.

Abbildung 18: Veränderung der Staatsausgaben nach Aufgabenbereichen durch Erhöhungen der Ausgaben für hitzebedingte Krankenhausaufenthalte in den Jahren 2030 und 2050, in Mio. Euro (auf 10 gerundet)



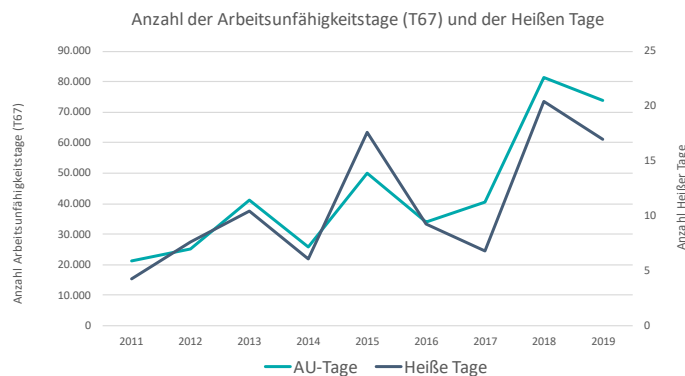
Die sonstigen Aufgabenbereiche umfassen 'Umweltschutz', 'Wohnungswesen und kommunale Einrichtungen', 'Soziale Sicherheit', 'Freizeitgestaltung, Sport, Kultur und Religion', 'Verteidigung' sowie 'Wirtschaftliche Angelegenheiten'

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Exkurs: Hitzebedingte Steigerung der Anzahl an Arbeitsunfähigkeits-Tagen

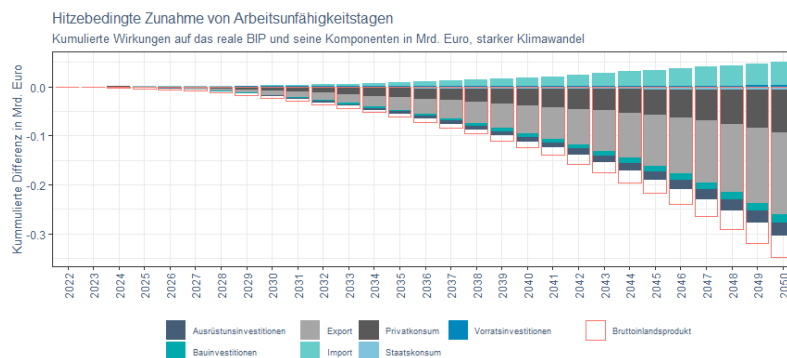
Neben zusätzlichen Krankenhauseinweisungen führt extreme Hitze auch zu einer Zunahme von Arbeitsunfähigkeitstagen (Schoierer et al. 2021). Unter dem ICD-10-Diagnoseschlüssel T67 sind Schäden durch Hitze und Sonnenlicht klassifiziert. Die Krankheitsartenstatistik der gesetzlichen Krankenversicherung zeigt besonders viele Arbeitsunfähigkeitstage unter dem ICD-10 T67 für die Hitzejahre der vergangenen Dekade. Für das Jahr 2018 sind rund 80.000 Arbeitsunfähigkeitstage für Schäden durch Hitze und Sonnenlicht (ICD-10 T67) angegeben (BMG 2018). Dabei ist dies als Untergrenze zu verstehen, da durch die Statistik nur Fälle erfasst werden, die bei einem Arzt vorstellig geworden sind und unter dem Diagnoseschlüssel T67 erfasst wurden. Andere möglicherweise hitzebedingt auftretenden Erkrankungen wie beispielsweise Kopfschmerzen oder Übelkeit werden so nicht erfasst. Es wird davon ausgegangen, dass mit einer Zunahme von Hitzetagen und Hitzewellen eine weiteren Zunahme von Krankheitsfällen und Arbeitsunfähigkeitstagen von Hitze auszugehen ist (Schoierer et al. 2021). Abbildung 19 zeigt den Verlauf der Arbeitsunfähigkeitstage und der Heißen Tage Abbildung 20 die kumulierten BIP-Wirkungen der hitzebedingten Zunahme von Arbeitsunfähigkeitstagen für den Zeitraum von 2022-2050. Bis zum Jahr 2050 ergeben sich so kumulierte Effekte von rund 0,35 Mrd. Euro.

Abbildung 19: Darstellung der Arbeitsunfähigkeitstage nach ICD-10 T67 und Anzahl Heiße Tage, 2011-2019



Quelle: eigene Darstellung, Arbeitsunfähigkeitstage (BMG 2019 und vorherige), Heiße Tage (DWD aus UBA (2021))

Abbildung 20: Kumulierte Wirkungen der hitzebedingten Zunahme von Arbeitsunfähigkeitstagen auf das reale BIP, 2022-2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

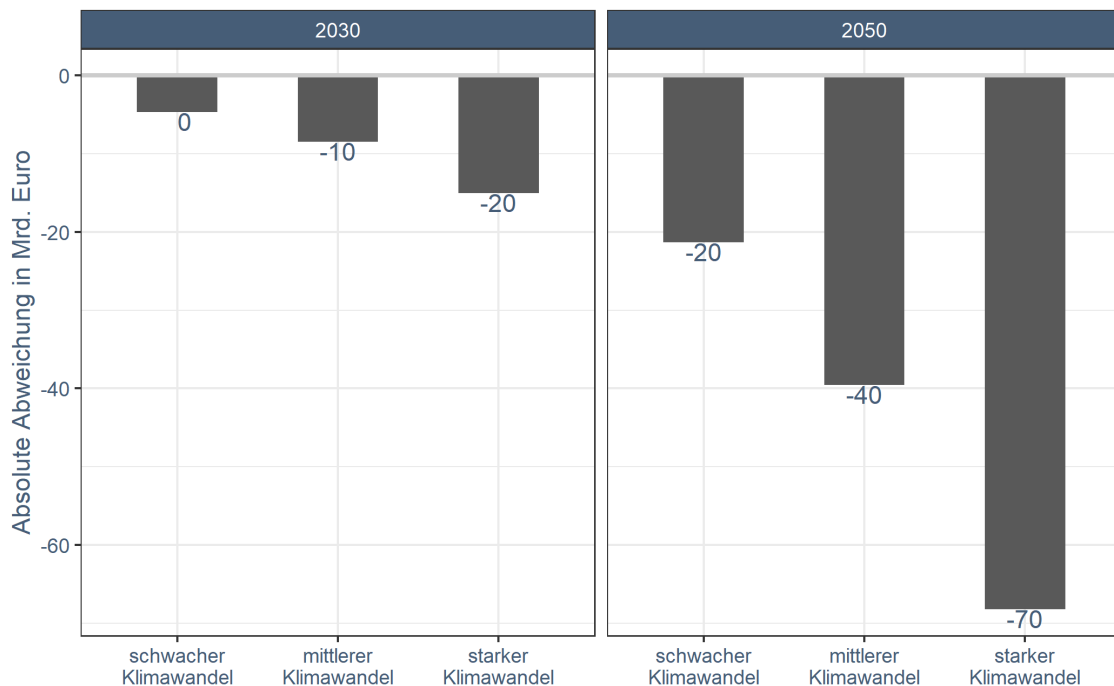
3.2.6 GESAMTSCHAU DER VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN FOLGEKOSTEN

Die oben dargestellten volkswirtschaftlichen Folgekosten für die ausgewählten Klimawirkungen verdeutlichen, welche ökonomischen Effekte und Wirkungen der Klimawandel in der Zukunft auslösen kann. Es reicht bei der Analyse der einzelnen Klimawirkungen nicht aus, diese isoliert zu betrachten und dabei nur die direkten ökonomischen Wirkungen zu berücksichtigen. Erst durch die Berücksichtigung der von den direkten Wirkungen ausgehenden indirekten und induzierten Effekte (siehe Abbildung 5) entsteht ein umfassendes Bild über die gesamtwirtschaftlichen Zusammenhänge und somit die möglichen volkswirtschaftlichen Folgekosten durch den Klimawandel für die deutsche Volkswirtschaft. Ein zerstörtes Gebäude stellt isoliert betrachtet zunächst nur eine Reduktion des Kapitalstocks dar, dem ein bestimmter Wert beigemessen werden kann. Durch die Berücksichtigung der daraus resultierenden weiteren Folgen (z.B. steigende Preise für Versicherungen, Produktionsausfälle bei Industriegebäuden) ergibt sich jedoch ein vollständiges Bild, wie es sich auch in der ökonomischen Wirklichkeit darstellen würde.

Berücksichtigt sind in dieser Gesamtbetrachtung jedoch nur die zu vor quantifizierten Klimawirkungen (siehe Kapitel 2.3 und 3.1). Darüber hinaus gibt es noch weitere immaterielle Schäden, die sich jedoch nicht unmittelbar monetär bewerten lassen und somit nicht in diese modellbasierte Analyse einbezogen werden konnten. Die hier ausgewiesenen volkswirtschaftlichen Folgekosten stellen somit jeweils nur eine Untergrenze der Gesamtkosten des Klimawandels für Deutschland dar.

3.2.6.1 Folgekosten gemessen am BIP und der Beschäftigung

Abbildung 21: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel – Wirkungen auf das reale BIP in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) in den Jahren 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 21 verdeutlicht für die Jahre 2030 und 2050, welche volkswirtschaftlichen Folgekosten sich mindestens durch alle oben betrachteten Klimawirkungen in Summe auf das reale BIP ergeben. Bei schwachem Klimawandel ergibt sich im Jahr 2030 ein negativer Effekt auf das BIP von 5 Mrd. Euro, im Jahr 2050 beträgt dieser negative Effekt 21 Mrd. Euro. Bei starkem Klimawandel steigt der negative Effekt auf das BIP jeweils um mehr als das Dreifache und liegt im Jahr 2050 bei fast 70 Mrd. Euro. Aus der obigen Zusammenschau der Einzelergebnisse ergibt sich, dass sich ca. die Hälfte dieser Folgekosten aus den verminderten Konsumausgaben und den Vorhaltungsentscheidungen der Unternehmen als Folge der Reaktion auf Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkregen, Flusshochwasser und Flut ergeben (s. Abschnitt 3.2.3). Die Effekte des globalen Klimawandels, die sich auf die internationalen Handelsströme auswirken und in den Szenario-Rechnungen zur Land- und Forstwirtschaft (Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2) sowie zur Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten zu Tage treten (Abschnitt 3.2.4.2), sind ebenfalls maßgebliche Treiber für die Höhe der Folgekosten in Form des realen BIP.

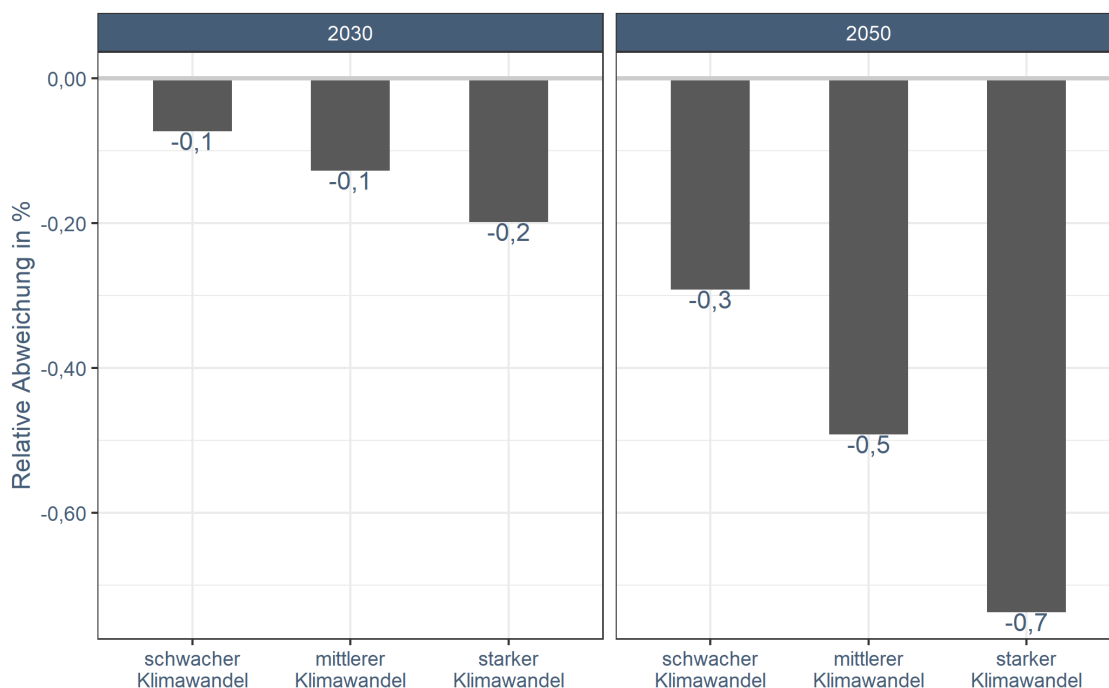
Tabelle 9: Kumulierte Kosten 2022 – 2050 durch Klimawandel in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für unterschiedlich schwere Verläufe des Klimawandels, 2050

	schwach	mittel	stark
Bruttoinlandsprodukt	-280	-530	-910
Privatkonsum	-290	-530	-890
Staatskonsum	-10	-20	-30
Ausrüstungsinvestitionen	-80	-120	-180
Bauinvestitionen	-30	-50	-90
Vorratsinvestitionen	-0	0	0
Export	-830	-1330	-1800
Import	-920	-1480	-2000

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Tabelle 9 verdeutlicht für das Jahr 2050, auf welche Werte sich die Komponenten des BIP über die Jahre 2022 bis 2050 durch die Folgen des Klimawandels insgesamt kumulieren. Insbesondere die Nachfrage aus dem In- und Ausland trägt zu den negativen Wirkungen auf das BIP bei. Sowohl der private Konsum durch die Vorhaltung und erhöhtes Sparen als auch geringere Exportaktivitäten haben bei allen Klimawirkungen deutlich negative Abweichungen zu einem Szenario ohne Klimawandel. Der mit diesem Nachfragerückgang einhergehende Effekt auf die Importe wirkt sich wiederum dämpfend auf das BIP aus. Der Produktionsrückgang in der Ökonomie sorgt dafür, dass sich auch negative Wirkungen auf Bauinvestitionen und Ausrüstungsinvestitionen ergeben.

Abbildung 22: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel – Wirkungen auf die Erwerbstätigen in Prozent in den Jahren 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 22 stellt die negativen Wirkungen auf die Beschäftigung insgesamt für die Jahre 2030 und 2050 vergleichend gegenüber. Im Jahr 2050 beträgt der negative Effekt auf die Beschäftigung bei starkem Klimawandel 0,7 %. Dies entspricht in absoluten Werten einem Rückgang der Beschäftigung um etwa 320 Tsd. Personen.

Die Ergebnisse sind in einer ähnlichen Größenordnung z.B. auch in der Analyse von Philip et al. (2021) zu finden. Dort werden bis zum Jahr 2070 kumulierte BIP-Verluste in Höhe von 730 Mrd. Euro ausgewiesen. Allein im Jahr 2070 beträgt der negative Effekt auf das BIP rund 70 Mrd. Euro bzw. 1,2 %, mit einem Beschäftigungsrückgang von 470 Tsd. Personen im Jahr 2070.

3.2.6.2 Auswirkungen auf Ungleichheit

Neben den makroökonomischen Effekten auf die Komponenten des BIP oder die Beschäftigung spielen insbesondere auch die sozialen und sozioökonomischen Wirkungen des Klimawandels in Zukunft eine immer bedeutendere Rolle. Soziale Unterschiede und Ungleichheiten haben Einfluss darauf, wie stark unterschiedliche Bevölkerungsgruppen den Folgen des Klimawandels ausgesetzt sind (Exposition) und darunter leiden (Vulnerabilität), wie schnell und erfolgreich sie darauf reagieren können (Resilienz) und welche Strategien sie zur Anpassung an den Klimawandel ergreifen können (Anpassungskapazität). Ein Beispiel für die Folgen sozialer Ungleichheit vor dem Hintergrund von Verteilungsgerechtigkeit ist, dass Gruppen mit geringerem Einkommen (häufig Alleinerziehende, Personen mit prekären Beschäftigungsverhältnissen, Menschen mit Migrationshintergrund oder Personen mit physischen oder psychischen Beeinträchtigungen) weniger zur Umweltbelastung und dem Klimawandel beitragen (z. B. durch Verzicht auf ein Auto), den Folgen aber stärker ausgesetzt sind (z. B. Feinstaub- oder Hitzebelastung).

durch günstigen, schlecht oder nicht sanierten Wohnraum an stark befahrenen Straßen) und gleichzeitig als Ausgleichsmöglichkeit aber weniger Zugang zu Grün- und Bewegungsflächen haben (Elkins 2005). Bei Extremwetterereignissen wie Starkregen und Flut können einkommensschwächere Gruppen durch die schlechtere Bausubstanz stärker betroffen sein und müssen anteilig mehr von ihrem Vermögen für die Wiederherstellung des Ausgangszustands aufwenden, wodurch die Ungleichheit noch verstärkt wird (Patankar 2015). Die Wirkungen des Klimawandels auf unterschiedliche soziale Gruppen sind insbesondere Gegenstand der aktuellen Forschung (vgl. UBA FKZ: 3721 48 103 0 Analyse der sozialen Dimensionen von Klimawandelfolgen und Entwicklung entsprechend differenzierter Politikinstrumente) und werden in Zukunft eine zunehmend wichtigere Rolle auch bei der Politikgestaltung einnehmen. Im Folgenden wird für die oben untersuchten Klimawirkungen und volkswirtschaftlichen Folgekosten kurz eingeordnet, welche sozioökonomischen Folgen sich für die Gesellschaft ergeben können.

Im Jahr 2050 liegen im Basisverlauf ohne voranschreitenden Klimawandel die verfügbaren Einkommen eines Arbeitnehmerhaushalts 16% über dem Durchschnitt. Haushalte, in denen der Haupteinkommensbezieher bzw. die Haupteinkommensbezieherin arbeitslos oder im Ruhestand sind, haben nur 43% bzw. 85% des Durchschnittseinkommens zur Verfügung. Die Einkommen liegen also um 57% bzw. 15% unter dem Durchschnittseinkommen. Durch den Klimawandel wird sich diese Ungleichheit noch verstärken. Der Abstand zum Durchschnittseinkommen erhöht sich für alle betrachteten Haushaltstypen. Die Arbeitnehmerhaushalte können also ihren positiven Abstand zum Durchschnittseinkommen weiter ausbauen. Die Arbeitslosen- und Ruhestandlerhaushalte entfernen sich immer weiter vom Durchschnittseinkommen, indem der negative Anteil immer größer wird. Dies liegt in zwei Effekten begründet: Zum einen verändert sich die Struktur der Haushalte und zum anderen verändern sich die Einkommensunterschiede zwischen Selbstständigen und Angestellten. So gibt es aufgrund der wirtschaftlich negativen Effekte und der damit verbundenen schwächeren Wirtschaftsleistung durch den Klimawandel weniger Arbeitnehmer:innenhaushalte (Angestellte/Arbeiter:innen) und Ruhestandshaushalte (Rentner:innen / Pensionsbeziehende) sowie mehr Arbeitslosenhaushalte, aber auch mehr Selbstständigenhaushalte (mit Ausnahme des Szenarios mit starkem Klimawandel). Einige Haushalte scheinen also ihren Ruhestand bzw. das Ausscheiden aus der Erwerbstätigkeit hinauszuzögern, um ein höheres Einkommen zur Bewältigung der gestiegenen Kosten zur Verfügung zu haben. Gleichzeitig wechseln andere Haushalte durch die schlechtere Arbeitsmarktsituation in die Arbeitslosigkeit oder versuchen durch Selbstständigkeit die Arbeitslosigkeit zu umgehen. Das Einkommen von Selbstständigen liegt durch die günstige Branchenzusammensetzung in den Szenarien mit Klimawandel höher als in der Referenz, während die Arbeitnehmer:innenentgelte pro Arbeitnehmer:in niedriger sind als in der Referenz. Diese gegenläufigen Effekte führen dazu, dass insgesamt das verfügbare Einkommen der Erwerbstätigen-Haushalte durch die Entwicklung bei den Selbstständigen höher liegen als ohne fortschreitenden Klimawandel. Der Abstand zum Referenzhaushalt, dessen Einkommen mit Ausnahme der mittleren Klimaentwicklung niedriger liegen als in der Referenz, nimmt also zu. Umgekehrt verschlechtert sich die Situation bei den Arbeitslosen und Ruhestandshaushalten, indem der Abstand zum Durchschnitt steigt. Die Einkommensungleichheit verstärkt sich daher mit zunehmendem Klimawandel.

Tabelle 10: Abweichung vom Durchschnittseinkommen im Basisverlauf für verschiedene Haushaltstypen und Veränderung dazu in den Klimaszenarien für das Jahr 2050

	Arbeitneh- mende	Arbeitslose	Renten-/ Pen- sionsbezie- hende
Abweichung vom Durchschnitts- einkommen im Basisverlauf (in %)	16%	-57%	-15%
Veränderung der Ungleichheit (Abweichung vom Durchschnitt) in %			
schwacher Klimawandel	1,6%	0,2%	0,6%
mittlerer Klimawandel	2,6%	0,3%	0,8%
starker Klimawandel	4,2%	0,3%	0,7%

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

3.2.6.3 Folgen für die UN-Nachhaltigkeitsziele

Neben dem reinen Wachstumsstreben wird auch dem Erreichen und Verbessern der UN-Nachhaltigkeitsziele (SDGs) eine immer größere Bedeutung beigemessen. Die SDGs sind Teil der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung und haben zum Ziel, Armut zu bekämpfen, die Umwelt zu schützen und allen ein lebenswertes Dasein auf der Erde zu ermöglichen. Zur Erreichung der Ziele wurde 2015 in der Agenda 2030 ein 15-Jahres-Plan vorgesehen. Allerdings ist davon auszugehen, dass nicht alle Ziele bis 2030 erreicht werden und die SDGs deshalb auch über 2030 hinaus nicht an Bedeutung verlieren werden. Vor dem Hintergrund des hier vorliegenden langfristigen Fokus des Szenario-Horizonts, werden die Effekte bis 2050 untersucht. Genauer soll hier der Einfluss des Klimawandels auf die SDGs (soweit abbildbar) eingehender betrachtet werden. Die Berechnung der SDG-Indikatoren im Modell folgt dabei in weiten Teilen den Berechnungsgrundsätzen des Statistischen Bundesamtes für die Bundesregierung, welche sich wiederum an der Agenda 2030 der Vereinten Nationen orientieren (<https://sdg-indikatoren.de>). Die Legende unter Abbildung 23 enthält dabei die Beschreibung des Indikators und in Klammern die Zuordnung zu den offiziellen Indikatoren der UN.

Das Netz in Abbildung 23 zeigt die Abweichung in der Entwicklung des Indikators für das jeweilige Nachhaltigkeitsziel unter den verschiedenen Ausprägungen des Klimawandels im Vergleich zu einer Entwicklung ohne zusätzlichen Klimawandel (dem Basisverlauf). Der Basislauf gibt den Indexwert 100 vor, d.h. Werte über 100 bei den Klimaszenarien bedeuten eine Verbesserung in der Erreichung des SDGs, darunter eine Verschlechterung. Als Entwicklung wird das Jahr 2050 mit dem Jahr 2021 verglichen.

Abbildung 23: Folgen des Klimawandels für das Erreichen ausgewählter UN-Nachhaltigkeitsindikatoren, Basisverlauf (ohne Klimawandel) = 100, Vergleich der Entwicklung 2050 gegenüber 2021



- 1 Veränderung Armutsorientierter öffentlicher Sozialausgaben in Prozent (1.b.1) (*)
- 2 Veränderung der Lebensmittelpreise gegenüber Preisen insgesamt in Prozentpunkten (*)
- 3 Veränderung des Anteils der Bevölkerung mit hohen Ausgaben für Gesundheit in Prozentpunkten (3.8.2) (*)
- 7a Veränderung des Anteils der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch in Prozentpunkten (7.2.1)
- 7b Veränderung der Energieintensität gemessen als Primärenergie zum BIP in Prozent (7.3.1)
- 8a Veränderung der Jährlichen Wachstumsrate des realen BIP pro Kopf in Prozentpunkten (8.1.1)
- 8b Veränderung der Jährlichen Wachstumsrate des realen BIP pro Erwerbstätigen in Prozentpunkten (8.1.1)
- 9 Veränderung der Wertschöpfung im Verarbeitenden Gewerbe im Verhältnis zum BIP und pro Kopf in Prozentpunkten (9.2.1)
- 10 Veränderung des Anteils des Arbeitseinkommens am BIP in Prozentpunkten (10.4.1)

* Für die Einheitlichkeit der Richtung der Indikatoren (> 100 positive Entwicklung, < 100 negative Entwicklung), wurden positive Entwicklungen, die eine Verschlechterung darstellen wie bei den Lebensmittelpreisen, ins Negative übersetzt. Der umgekehrte Fall gilt für die Gesundheitsausgaben, bei denen eine Reduktion eine positive Entwicklung darstellt.

Quelle: <https://sdg-indikatoren.de/>, eigene Berechnungen

Erkennbare Unterschiede zum Basislauf ergeben sich vor allem für das Ziel 2 „Kein Hunger“, dargestellt durch die Veränderung der Lebensmittelpreise gegenüber Preisen insgesamt, sowie das Ziel 10 „Weniger Ungleichheit“, repräsentiert durch die Veränderung des Anteils des Arbeitseinkommens am BIP in Prozentpunkten (Indikator 10.4.1). Beide Ziele werden mit zunehmendem Klimawandel immer schlechter erreicht. Bereits unter den aktuellen politischen Entwicklungen im Jahr 2022 zeigt sich, dass steigende Lebensmittelpreise vor allem einkommensschwächere Haushalte vor ernstzunehmende Probleme bei der Versorgung mit Lebensmitteln stellen und einen massiven Anstieg des

Besuchs von gemeinnützigen Einrichtungen wie den Tafeln nach sich ziehen.¹ Die Szenario-Ergebnisse zeigen, dass sich diese prekären Risiken durch den Klimawandel sehr wahrscheinlich verstärken werden. Im Vergleich zum Ziel 2, das eine dramatische Verschlechterung bedeutet, verändert sich Ziel 1 (keine Armut) kaum. Letzteres wird repräsentiert durch die Veränderung der Staatsausgaben für soziale Sicherung, wobei eine Erhöhung der Staatsausgaben als Verschlechterung angesehen wird. So nehmen die Staatsausgaben für die soziale Sicherung mit dem Klimawandel zu, allerdings deutlich weniger stark als die Preisanstiege bei den Lebensmitteln. Dies deutet darauf hin, dass viele Haushalte die gestiegenen Lebenshaltungskosten selbst tragen müssen, da sie (noch) nicht in die soziale Sicherung fallen (wollen) oder dass die Leistungen der sozialen Sicherung nicht ausreichend schnell den Preissteigerungen angepasst werden können. Es könnte also durchaus zu einer Zunahme von (versteckter) Armut kommen, die durch den Indikator nicht ausreichend abgebildet werden kann.

Verstärkt wird diese ungünstige Entwicklung durch den anteiligen Rückgang derer, die reguläre Einkommen aus einer Erwerbstätigkeit heraus beziehen. Durch die sinkende Zahl der Beschäftigten in den Klimawandel-Szenarien muss der Staat vermehrt einspringen. Die staatlichen Ersatzzahlungen (Grundsicherung, künftig Bürgergeld) sichern jedoch nur das Existenzminimum. Haushalte in Grundsicherung bzw. Bürgergeld sind von steigenden Lebensmittelpreisen deshalb besonders betroffen.

Der Klimawandel wirkt sich mit Blick auf die Kosten auf verschiedene SDGs aus. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Berechnungen nur die Effekte der in dieser Untersuchung ausgewählten und quantifizierten Klimawirkungen auf die dargestellten SDG-Indikatoren enthalten. Es handelt sich somit um eine erste Einschätzung und keine vollumfängliche Bewertung. Besonders negativ sind hiernach die Effekte für die Erreichbarkeit von SDG 2 „Kein Hunger“ durch steigende Lebensmittelpreise und SDG 10 „Weniger Ungleichheit“ durch Veränderung in der Beschäftigtenstruktur, wodurch zwei sensible Bereiche betroffen sind. Unter dem Nachhaltigkeitsaspekt sollten die Kosten des Klimawandels daher sehr hoch bewertet werden.

3.2.7 MÖGLICHE ENTWICKLUNGEN BIS ZUM JAHR 2100

Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 tätigt in einem breiten Umfang Aussagen zu möglichen Klimawandelrisiken in der Zukunft. Gleichzeitig stellt sie deutlich heraus, wo die Grenzen der Analyse liegen. Aussagen über die Zukunft sind mit hohen Unsicherheiten verbunden. Während manche Klimarisiken der Zukunft gut erforscht sind und somit das Risiko gut bewertet werden kann, befinden sich andere Klimawirkungen und Risiken noch in einem Anfangsstadium der Forschung oder können schlicht aufgrund hoher zu erwartender Unsicherheiten nicht mit ausreichender Gewissheit bewertet werden. Dementsprechend ist bei der Interpretation der Klimarisiken der Grad der Gewissheit in der KWRA 2021 zu berücksichtigen. Je weiter man den zeitlichen Horizont in die Zukunft verlegt, desto unsicherer werden die Möglichkeiten, konkrete Aussagen oder

¹ Vgl. dazu folgende Pressemitteilungen: <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/gesellschaft/tafel-not-ukraine-inflation-lebensmittel-preise-100.html>, <https://www.diakonie.de/diakonie-zitate/steigende-lebensmittelpreise-verschaerfen-die-armut-in-deutschland>, <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/interview-armutforscher-butterwege-steigende-preise-armut-kinder-in-bw-100.html>

Tendenzen für mögliche Entwicklungen ableiten zu können.

Jede getroffene Entscheidung in der Zukunft kann dafür sorgen, dass sich eben die daran anschließende Zukunft ändert. Der Klimawandel und die daraus resultierenden Klimawirkungen sind dabei nur eine mögliche Stellschraube für die zukünftige Entwicklung der Welt. Sozioökonomische Entwicklungen bedingen ihrerseits z.B. weitere Begleiterscheinungen wie Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung, die wiederum starken Einfluss auf die zukünftige Entwicklung haben (Kahlenborn et al. 2021a).

Vor diesem Hintergrund werden an dieser Stelle, wenn möglich, Tendenzen aufgezeigt, wie sich die durch die oben dargestellten Klimawirkungen ergebenden volkswirtschaftlichen Folgekosten bis zum Jahr 2100 entwickeln können.

Die Klimafolgen für die **Landwirtschaft** weisen in Studien bis 2050 bereits eine hohe Bandbreite an möglichen Effekten auf (vgl. Abschnitt 3.1.1). Für die deutsche Landwirtschaft ist bis 2050 zudem nur von geringen Einbußen auszugehen und auch für die Zeit danach unterliegt sie nach Brasseur et al. (2017, S. 190) nur einem geringen Anpassungsdruck. Dies wird damit begründet, dass eine hohe Unsicherheit bezüglich der Entwicklung auf den Agrarmärkten, den politischen Rahmenbedingungen sowie den Klimaveränderungen besteht und die Landwirtschaft gleichzeitig sehr anpassungsfähig ist, indem sie sich technologisch und strukturell schnell verändert (Brasseur et al. 2017, S. 190). International werden Anbauggebiete, die bereits jetzt vom Klimawandel betroffen sind (Mittelmeerraum, Mitteleuropa, südliches Amazonasgebiet südliches Afrika) (Shukla et al. 2019) und für die bis 2050 bereits hohe Ertragsverluste angenommen werden, bis 2100 eine Verstärkung dieser Folgen ausgesetzt sein: Schlenker & Roberts (2009) z. B. ermitteln für die USA, dass sich der Ertragsverlust bei Mais im ungünstigsten Fall 2100 gegenüber 2050 mehr als verdoppelt. Die Klimafolgekosten im Bereich Landwirtschaft werden bis 2100 also weiterhin überwiegend über den globalen Klimawandel und internationale Ertragseinbußen determiniert, die sehr wahrscheinlich noch an Fahrt aufnehmen werden. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme, dass global nicht mit neuen Züchtungen, besseren Bewässerungssystemen, Verschiebungen der Anbauggebiete und Wechsel der Anbauarten und -zeiten auf den Klimawandel reagiert wird.

Auch in der **Forstwirtschaft** sind die Ertragseinbußen infolge des Klimawandels mehr als ungewiss. Tei et al. (2017) weisen für den Zeitraum 2006 bis 2100 für Deutschland gemischte Ergebnisse von -0,02 bis +0,02 bezüglich des Baumwachstums aus. Buth et al. (2015) zeigen, dass die Sensitivität der Holzproduktion gegenüber dem Klimawandel abhängig ist von der Baumart, deren Anpassungsfähigkeit, den Standortbedingungen, der Waldfläche, dem Bestandsmix etc. und sich unter aktuellen Gegebenheiten schon keine belastbaren und konkreten Ergebnisse erzielen lassen. Eine Aussage zu einer möglichen Entwicklung bis 2100 ist daher weder stichhaltig noch glaubwürdig.

Für **Schäden an Gebäuden und Infrastruktur** durch Starkregen oder Hochwasser lassen sich keine belastbaren Aussagen zur möglichen Entwicklung der Schäden und Schadenshöhe bis zum Jahr 2100 treffen. Die KWRA 2021 stellt bereits für die Bewertung des möglichen Klimarisikos heraus, dass sich keine klaren Trends bei der Entwicklung der Niederschläge oder der Entstehung von Flusshochwassern ableiten lassen. Neben diesen fehlenden Informationen haben viele weitere Größen einen Einfluss auf die Schäden an Gebäuden. Zwar handelt es sich bei Gebäuden um langlebige

Investitionsgüter, welche den betrachteten Zeithorizont bis zum Jahr 2100 also überleben können. Gleichzeitig kann die Entwicklung und der technische Fortschritt in den kommenden 80 Jahren aber so weit voranschreiten, dass sich auch technische Lösungen ergeben könnten, die Schäden an Gebäuden durch besagte Extremwetterereignisse potenziell reduzieren können. Insbesondere muss auch der Effekt der möglichen Anpassungsmaßnahmen für Gebäude und Infrastruktur berücksichtigt werden. Bestandsimmobilien könnten aufgerüstet werden, um den Gefahren von Starkregen und Überschwemmungen besser widerstehen zu können. In Abhängigkeit dieser Entwicklungen werden auch die Haushalte und Unternehmen entsprechend reagieren und ihre Entscheidungen anpassen. Je nach individueller Einschätzung des Risikos halten sie wie oben dargestellt mehr oder weniger Mittel vor. Da die Einschätzung dieser Entwicklung bereits bis zum Jahr 2050 mit hoher Unsicherheit verbunden ist, kann diese Entwicklung bis zum Jahr 2100 nicht belastbar eingeschätzt werden. Sollte sich die Entwicklung wie oben bis zum Jahr 2050 beschrieben bis zum Jahr 2100 weiter fortsetzen, so fallen die volkswirtschaftlichen Folgekosten entsprechend dem oben skizzierten Wachstum deutlich höher aus.

Für die Beeinträchtigung der **Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen durch Niedrigwasser** lassen sich bis zum Jahr 2100 kaum belastbare Ergebnisse ermitteln. Die Wirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserereignisse sind komplex und sind bis heute nicht vollständig erfasst (Riedel et al. 2021). Auf das Abflussgeschehen von Fließgewässern wirken verschiedenste Faktoren wie regional und saisonal veränderte Wetterlagen und Windfelder, Niederschlagsmuster, und Temperaturen, die sich auch auf Verdunstung und Grundwasserneubildung auswirken (Riedel et al. 2021). Beispielsweise wird für die Wintermonate eine Zunahme der Abflüsse erwartet, da durch die Erwärmung Niederschläge vermehrt als Regen und nicht als Schnee fallen (Riedel et al. 2021). Während für Niedrigwasser bis zum Jahr 2050 eher moderate Änderungen erwartet werden, werden insbesondere ab Mitte des Jahrhunderts häufigere, längere und intensivere Niedrigwasserereignisse erwartet (Nilson et al. 2020). Freifließende Gewässer sind dabei stärker von natürlichen Schwankungen und somit von Niedrigwassersituationen betroffen (Nilson et al. 2020). Das Auftreten von Niedrigwasser wird zudem auch von weiteren Reaktionen auf den Klimawandel wie beispielsweise Wasserentnahmen für Energie, Trinkwasser oder Landwirtschaft beeinflusst (Riedel et al. 2021). Inwieweit sich künftige Niedrigwasserereignisse auf den Transport und damit auch auf den Bereich Industrie und Gewerbe auswirken hängt des Weiteren unter anderem von der Art und Menge der künftig zu transportierenden Güter, dem Anteil der Binnenschiffahrt am Transportaufkommen, dem Tiefgang verwendeter Binnenschiffe sowie dem Vorhandensein von Ausweichstrecken, Transportmitteln, usw. ab.

Lange et al. (2020) zeigen auf, dass eine globale Erwärmung von 2 bzw. 3 Grad die Landfläche, die jährlich extremen Ereignissen ausgesetzt ist, voraussichtlich um den Faktor 5,3 bzw. 8,0 vergrößert. Auch Swain et al. (2018) ermitteln einen deutlichen Anstieg in der Häufigkeit von Extremwetterereignissen für Kalifornien bis 2100. Je mehr Länder bzw. weltweite Flächen gleichzeitig von extremen Ereignissen wie Flussüberschwemmungen, tropische Wirbelstürme, Ernteauffälle, Waldbrände, Dürreperioden und Hitzewellen betroffen sind, umso mehr werden die internationalen Handelstätigkeiten und die **Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten** eingeschränkt bzw.

vom Klimawandel beeinflusst. Bis 2100 ist also grundsätzlich mit zunehmenden Störungen im Welthandel und in der Versorgung zu rechnen. Dabei ist nicht zwingend ein linearer Verlauf anzunehmen. Gleichzeitig ist es aber wahrscheinlich, dass sich die betroffenen Wirtschaftszweige anpassen und nach alternativen Grundstoffen bzw. Herstellungsverfahren suchen werden.

Die betrachteten hitzebedingten Auswirkungen auf das **Gesundheitssystem** umfassen Abschätzungen zu zusätzlichen hitzebedingten Krankenhauseinweisungen bzw. -tagen. Diese hängen von der Klimaentwicklung, der demografischen Entwicklung sowie auch von der Entwicklung der zukünftigen Krankenhauskosten ab. Während sich die Klimaprojektionen in Bezug auf die Entwicklung der Heißen Tage bis 2050 größtenteils überlappen, laufen diese zum Ende des Jahrhunderts zunehmend auseinander (s. Tabelle 3 in Pfeifer et al. 2020). Während im schwachen Klimaszenario keine weitere Zunahme an Heißen Tagen projiziert wird, ergeben sich für das starke Klimaszenario absolut bis zu mehr als 50 Heiße Tage pro Jahr (bis zu 48 zusätzliche Tage zur Basisperiode), mit einem ab Mitte des Jahrhunderts eher exponentiellem statt linearem Verlauf. Auch Klauber & Koch (2021) geben an, dass sich im Vergleich zum Durchschnitt der Jahre 2009 – 2018 bei einem starken Klimawandelszenario Steigerungen der hitzebedingte Krankenhauseinweisungen von 488% ergeben können. Unberücksichtigt bleiben jedoch die demografischen Entwicklungen sowie auch die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen. In Bezug auf die menschliche Gesundheit sind jedoch nicht nur monetär bewertbare Gesundheitskosten, sondern insbesondere auch weitere Faktoren wie vermiedene Todesfälle, vermiedene Verschlechterung des Gesundheitszustandes und allgemeines Wohlbefinden von besonderer Relevanz.

4 MODELLBASIERTE EX-ANTE UNTERSUCHUNG DER VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN FOLGEKOSTEN DES KLIMAWANDELS IN DEUTSCHLAND: ANPASSUNGSKOSTEN

4.1 KLIMAWANDEL UND ANPASSUNG: EIN PERSPEKTIVENWECHSEL

Die Ausführungen im Kapitel 3 haben die volkswirtschaftlichen Folgekosten durch Klimawandel im Detail analysiert. Die dortigen Analysen basieren auf einer Szenarioanalyse zwischen einer Welt ohne Klimawandel und jeweils unterschiedlich stark angenommenem Klimawandel in der Zukunft. Ein Szenario ohne Klimawandel kann jedoch nicht als Maßstab für die Zukunft angenommen werden. Der Klimawandel ist bereits in der heutigen Realität präsent und die Auswirkungen lassen sich an verschiedenen Extremwetterereignissen und steigenden Temperaturen ablesen. Diese Wirkungen sind das Ergebnis des vergangenen menschlichen Handelns und Verhaltens, welches sich heute nicht mehr ändern lässt. Jedoch lassen sich die Auswirkungen des Klimawandels in der Zukunft mit entsprechender Änderung von Verhaltensweisen und dem Ergreifen von Gegenmaßnahmen abmildern.

Den „normalen“ Wachstumspfad für eine Ökonomie, der auf einer Fortschreibung der Entwicklung aus der Vergangenheit mittels Trendprojektionen beruht, gibt es bei Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels nicht mehr. Ökonomische Modelle müssen heute schon in einem Business as usual Szenario das Unvermeidliche berücksichtigen, und dazu zählen u.a. die Folgen des Klimawandels. Der Klimawandel führt zu Knappheiten (z.B. Flächen, Güter), zu Preisreaktionen, zu unfreiwilligen Investitionen zur Schadensbekämpfung etc. (vgl. Wolter et al. 2021). All diese Effekte führen zu verschiedenen sozioökonomischen Verschiebungen und Reaktionen, die in einem ökonomischen Modell berücksichtigt werden können und müssen.

Gerade vor dem Hintergrund der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist es entscheidend, dass die Diskussion immer in Zusammenhang mit Klimawandel und auch Klimaschutzanstrengungen erfolgt. Klimaschutzanstrengungen haben Einfluss auf die Entwicklung des Klimawandels und können Anpassungsmaßnahmen obsolet oder in einem geringeren Ausmaß erforderlich machen. Ohne Klimawandel ergibt sich keine Notwendigkeit, in Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu investieren. Zum einen vermindern Anpassungsmaßnahmen die durch Extremwetterereignisse und graduelle Temperatur- und Niederschlagsveränderungen entstandenen Schäden und damit die Defensivausgaben, die nach Schadensereignissen ohne Anpassung fällig werden. Zum anderen führt ihre Umsetzung zu Investitionen, welche ihrerseits zu positiven Wachstumsimpulsen in der Ökonomie führen. Des Weiteren tragen sie auch idealerweise zu einer Verbesserung des Lebensumstände bei. Damit nehmen Klimafolgenanpassungsmaßnahmen in einem plausiblen ökonomischen Entwicklungspfad mit Klimawandel die Last der Klimafolgen, woraus ein betriebswirtschaftlicher und in Summe volkswirtschaftlicher Ertrag entsteht. Einige Anpassungsmaßnahmen können zudem auch gleichzeitig zum Klimaschutz beitragen. Es stellt sich nicht die Frage, wer die Kosten trägt, sondern wer den Ertrag hat. **Es sind also nicht notwendigerweise Klimafolgenanpassungsmaßnahmen oder gar -anpassungskosten, sondern Klimafolgenanpassungsinvestitionen, mit all ihren positiven Impulsen und Wirkungen.** Investitionen in

Hochwasserschutz verringern z.B. die Kosten des Wiederaufbaus nach Überschwemmungen und senken so die Opportunitätskosten sowie Rückstellungen bei Versicherungen, Unternehmen und Haushalten (vgl. Wolter et al. 2021).

Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel können jeweils sehr unterschiedlich ausformuliert und gestaltet sein: von eher harten Anpassungsmaßnahmen wie der Anpassung von Infrastrukturen reichen die Maßnahmen hin zur Anpassung von Rechtsinstrumenten und Normen, der Ausschreibung von Forschungsarbeiten und Monitoringberichten oder auch dem Auflegen von Informations- und Kommunikationskampagnen zur Aufklärung.

Lehr et al. (2020) nennen unterschiedliche Gründe, warum die ökonomische Bewertung von Anpassung an den Klimawandel sehr herausfordernd ist. Neben den Unsicherheiten bzgl. der zu erwartenden Klimawandelwirkungen in der Zukunft ist es auch die Dynamik des Klimas, auf welche Anpassungsmaßnahmen immer neu reagieren müssen. Sozio-ökonomische Systeme sind träge gegenüber Änderungen, was die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen in der Realität erschwert. Gerade sehr einschneidende Anpassungsmaßnahmen, die eine komplett neue Ausrichtung erforderlich machen, lassen sich daher nicht leicht umsetzen. Die hohe Regionalität von Anpassungsmaßnahmen machen eigentlich eine kleinteilige Analyse auf regionaler Ebene erforderlich. Die Datenlage zur Beschreibung von Anpassungsmaßnahmen ist häufig unzureichend. Gerade letzterer Punkt ist ein entscheidender Faktor, der die Abbildung von Anpassungsmaßnahmen in einem ökonomischen Modell stark erschwert. Für einzelne Anpassungsmaßnahmen bedarf es eigentlich der Infos zu Kosten und Ertrag, um eine plausible Abbildung in einem ökonomischen Modell zu ermöglichen und damit die volkswirtschaftlichen Folgekosten von Anpassung bestimmen zu können. Für die hohe Anzahl an unterschiedlichen Anpassungsmaßnahmen ist es ohne Expertenkenntnisse und weitere Forschungsanstrengungen unmöglich, diese Informationen und Daten zu gewinnen. **Im Rahmen dieser Arbeit können die Anpassungsmaßnahmen daher nur grob abgeschätzt werden und einen grundsätzlichen Eindruck über mögliche Kostenhöhe und volkswirtschaftliche Effekte liefern.**

Die Auswirkungen des Klimawandels und die damit einhergehenden Schäden sind in den vergangenen Jahren an vielen Stellen sichtbar geworden. Die Hitzesommer 2018 und 2019, welche zu den wärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen gehörten, oder die verheerenden Sturzfluten in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz im Juli 2021 verdeutlichen eindringlich, dass klimawandelbedingte Extremwetterereignisse insbesondere auch Deutschland schwer treffen können (vgl. Trenczek et al. 2022c; Trenczek et al. 2022b). Klimawandel und die resultierenden Schäden rücken so auch in den Fokus von Gesellschaft, Wirtschaft und Politik. Neben dem Klimaschutz bekommt somit auch die Anpassung an den Klimawandel eine zunehmend wachsende Bedeutung in der deutschen Klimapolitik.

Der politische Rahmen in Deutschland wurde im Jahr 2008 mit dem Beschluss der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) gesetzt. Zusammen mit den regelmäßig weiterentwickelten Aktionsplänen Anpassung (APA), der die in der DAS formulierten Ziele mit konkreten Aktivitäten, Maßnahmen und Handlungsempfehlungen unterlegt, bildet die DAS den entscheidenden politischen Rahmen für die Stärkung der Anpassungskapazität in

Deutschland. Im Rahmen der DAS legt die Bundesregierung Monitoringberichte vor, welche die Wirkungen des Klimawandels mit wissenschaftlich gesicherten Daten unterlegen. Diese Monitoringberichte informieren somit über die bereits beobachtbaren Folgen des Klimawandels. Der Monitoringbericht von 2015 wurde mit einem weiteren Bericht im Jahr 2019 fortgeschrieben. Auch in Zukunft soll alle vier Jahre eine Aktualisierung erfolgen.

2015 wurde der erste Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie mit dem zweiten Aktionsplan Anpassung (APA II) beschlossen und im Jahr 2020 wurde der zweite Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie mit dem dritten Aktionsplan Anpassung (APA III) veröffentlicht. Der APA II bzw. APA III stellt sowohl bereits laufende als auch zukünftige Maßnahmen zum Umgang mit dem Klimawandel und seinen Folgen dar. Wesentliche Grundlagen für die Fortschrittsberichte umfassen die Monitoringberichte zur DAS sowie die Klimawirkungs- und Risikoanalysen (bzw. Vulnerabilitätsanalysen). Derzeit arbeitet die Bundesregierung an einer Weiterentwicklung der DAS, hin zu einer vorsorgenden Klimaanpassungsstrategie mit konkreten messbaren Zielen. Den verbindlichen Rahmen soll das mit dem Koalitionsvertrag angekündigte Klimaanpassungsgesetz bilden (Die Bundesregierung 2022).

4.2 QUANTIFIZIERUNG VON AUSGEWÄHLTEN ANPASSUNGSMASSNAHMEN AN DEN KLIMAWANDEL

Die nationalen Maßnahmen des Aktionsplan Anpassung III mit Stand 21.10.2020 sind im zweiten Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie dargestellt. Der APA III ist nach Clustern strukturiert, welche die Handlungsfelder der DAS thematisch bündeln. Für die insgesamt 7 Cluster werden die einzelnen Maßnahmen und Instrumente zur Anpassung an den Klimawandel beschrieben.

Auch die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 zeigt Möglichkeiten auf, Klimarisiken durch Anpassung zu adressieren. Für die 29 größten Klimarisiken wurden Anpassungsmöglichkeiten identifiziert. Für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts wurden diese Anpassungsmöglichkeiten daraufhin bewertet, wie stark sie zukünftige Klimarisiken senken können (vgl. Kahlenborn et al. 2021b). Neben sehr konkreten Anpassungsmaßnahmen, die sich unmittelbar auf die Reduktion von Schäden durch Klimawandel auswirken können, analysiert die KWRA 2021 auch Interventionen, die eher abstrakt wirken und neue Rahmenbedingungen schaffen. Es werden zwei unterschiedliche Niveaus an Anpassung bei der Bewertung der Klimarisiken mit Anpassung unterschieden:

1. Es werden die **im APA III beschlossenen Maßnahmen** unter realistischen Bedingungen umgesetzt.
2. Es wird die **maximal mögliche konventionelle Anpassung** umgesetzt. Das bedeutet, dass auch Maßnahmen umgesetzt werden, die über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehen und unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden können. Diese weitreichende Anpassung schließt die im APA III beschlossenen Maßnahmen mit ein.

Die Analyse der Anpassungskapazität auf der Ebene der Klimawirkungen in der KWRA

2021 basiert auf Literatur und Studienergebnissen sowie Experteninterviews. Für die Einschätzung der Anpassungskapazität wurden Aspekte wie die Wirksamkeit zur Reduktion des Klimarisikos oder die Gewissheit der Aussagen und Anpassungsdauer berücksichtigt. Der Fokus liegt auf dem Zeitraum bis Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060), für das Ende des Jahrhunderts konnten lediglich Trendeinschätzungen abgegeben werden. Wichtig ist zu erwähnen, dass es sich bei den Einschätzungen der Anpassungskapazität lediglich um qualitative Aussagen handelt, welche die Möglichkeiten zur Reduktion des jeweiligen Klimarisikos beschreiben. Die KWRA 2021 versteht unter Anpassungskapazität die Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und anderen Lebewesen, sich auf potenzielle Schäden einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren. Die KWRA 2021 enthält explizit keine Quantifizierung bzgl. der Kosten und Erträge von Anpassungsmaßnahmen.

Tröltzsch et al. (2012) geben z.B. im Rahmen des Forschungsprojekts zu Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel eine detaillierte Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland ab. Es wird auch dort deutlich darauf hingewiesen, dass bei der Abschätzung von Kosten und Nutzen der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel diverse Probleme auftreten können, da zahlreiche komplexe und unsichere Faktoren in die Bewertung einfließen und verschiedene Anpassungspfade für Auswirkungen des Klimawandels möglich sind.

Lehr et al. (2020) führen eine umfangreiche integrierte volkswirtschaftliche Modellierung von Politikinstrumenten der Anpassung an den Klimawandel durch. Auch diese Analyse schließt nur eine Auswahl an Anpassungsmaßnahmen ein, die von hoher Bedeutung sind, sich ökonomisch in einem Modell abbilden lassen und sich auf die für die Analyse ausgewählten Handlungsfelder beziehen.

Die Analyse der volkswirtschaftlichen Folgekosten von Anpassung muss insbesondere mit den folgenden Unsicherheiten bzw. Fragestellungen umgehen und geeignete Annahmen treffen:

- Entwicklung des Klimas und der damit einhergehenden Klimawirkungen?
- Monetäre Bewertbarkeit der Anpassungsmaßnahme möglich?
- Kosten der Anpassungsmaßnahme? Entwicklung über die Zeit?
- Erwarteter Ertrag der Anpassungsmaßnahme? Entwicklung über die Zeit?
- Anpassungsdauer und zeitlicher Horizont?
- Zielgenaue Umsetzung möglich?
- Wechselwirkungen zwischen Anpassung und Klimaschutz?
- Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Anpassungsmaßnahmen
- Wechselwirkungen mit sozioökonomischen Entwicklungen?

Die Fülle an unsicheren Einflussfaktoren verdeutlicht, dass die Ergebnisse einer solchen Analyse ebenfalls mit hohen Unsicherheiten verbunden sind und nur eine mögliche Entwicklung quantifizieren. Weicht auch nur ein Parameter in der Zukunft von den getroffenen Annahmen ab, können sich sämtliche Parameter in der Realität ebenfalls neu justieren und so ein ganz anderes Bild der Zukunft zeichnen. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden zunächst für die in Kapitel 3 untersuchten Klimawirkungen die in

der KWRA 2021 genannten Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung sowie die Möglichkeiten für eine weiterreichende Anpassung aufgelistet. Nicht für jede hier untersuchte Klimawirkung enthält die KWRA 2021 auch Ausführungen zur Anpassungskapazität. In einem zweiten Schritt wird schließlich eine mögliche Quantifizierung vorgenommen, um die jeweiligen Anpassungskapazitäten als Input für die modelltheoretische Untersuchung der volkswirtschaftlichen Folgekosten durch Anpassung nutzen zu können.

Häufig werden die Begriffe Anpassungsmaßnahme und Anpassungsinstrument synonym verwendet. Tabelle 11 stellt die Begriffsdefinitionen nochmals heraus. Während die Maßnahmen zunächst eine Handlung ist, die dem Anpassungsziel dient, beschreiben die Instrumente die Möglichkeiten des Staates, für die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen Anreize zu schaffen. Für diese Analyse soll der Fokus auf den Anpassungsmaßnahmen liegen.

Tabelle 11: Begriffsverständnis – Anpassungsziel, -maßnahme und -instrument

Begriff	Beschreibung	Beispiele
Ziel	Angestrebter zukünftiger Zustand, welcher sich auf die Verminderung negativer Folgen des Klimawandels (oder die Nutzung von mit dem Klimawandel verbundenen Chancen) bezieht	Verbesserung des Stadt- und Gebäudeklimas: Vermeidung von Überhitzung und Austrocknung (Wasserrückhaltung)
Maßnahme	Handlung, die einem Anpassungsziel im obenstehenden Sinne dient, also auf die Verminderung negativer Folgen des Klimawandels bzw. das Nutzen von mit dem Klimawandel verbundenen Chancen abzielt	Grüne Dächer, Fassadenbegrünung
Instrument	Einwirkungsmöglichkeit des Staates, z.B. um Anpassungsmaßnahmen vorzuschreiben / zu regulieren, zu initiieren oder Anreize dafür zu schaffen	Bauvorschriften (ordnungsrechtliches Instrument), Standards und Normen (Kooperationsinstrument), Steuerliche Vergünstigungen (ökonomisches Instrument), Direkte finanzielle Förderung, Informationskampagnen

Quelle: Blobel et al. (2016)

Landwirtschaft

In Tabelle 13 sind die Anpassungsmaßnahmen aus der KWRA 2021 zur Klimawirkung „Ertragsausfälle in der Landwirtschaft“ aufgeführt. Bei vielen Maßnahmen handelt es sich um relativ „weiche“ Faktoren wie Ändern der Anbaugebiete / Fruchtfolge / Bewirtschaftungszeitraum, die sich nicht direkt in das Modell eintragen lassen. Zudem entstehen keine Kosten und keine Änderungen, wenn nur die Fruchtfolge geändert wird, dies aber in der Summe keinen wesentlichen Einfluss auf Aufwand und Ertrag hat, da so ein Weg gefunden wurde, ihn unter Klimawandelbedingungen unverändert zu erwirtschaften. Ebenfalls nicht im Modell abbildbar sind Notfallpläne, die Entwicklung von

Risikomanagementstrategien, Finanzmaßnahmen zur Liquiditätssicherung, der Aufbau eines Klimaschadenskatasters sowie Bildungs- und Beratungsangebote. Investitionen in die Digitalisierung, Pflanzenbausysteme, Agrartechnik, technische Anlagen, Bewässerungssysteme etc. hingegen lassen sich gut in das Modell einbauen. Neben den Kosten entstehen durch Investitionen immer auch positive Impulse. Zudem ist damit zu rechnen, dass vor allem in innovative Verfahren investiert wird, um langfristig wettbewerbsfähig zu sein und auf dem volatilen Markt um landwirtschaftliche Produkte bestehen zu können. Inwiefern und in welchem Umfang die bereits regulär geplanten zukünftigen Investitionen Anpassungscharakter haben ist dabei unklar und bleibt in den hier gesetzten Annahmen unberücksichtigt. Es ist aber davon auszugehen, dass sich die landwirtschaftlichen Betriebe automatisch in ihrem Investitionsverhalten den geänderten Umweltbedingungen anpassen werden und in die Produktions-, Bewässerungstechnik und Anbauarten investieren, die ihnen langfristig den größtmöglichen Ertrag sichern.

Im Einzelnen wird im Anpassungsszenario für die Landwirtschaft unterstellt, dass sich die durchschnittlichen jährlichen Investitionen in neue Ausrüstungen und sonstige Anlagen gegenüber dem Basisverlauf ohne voranschreitendem Klimawandel verdoppeln. Für das Jahr 2050 ergibt sich daraus eine Abweichung in den Klimawandelszenarien von ca. 6% gegenüber dem Basisverlauf. Des Weiteren wird unterstellt, dass sich die Produktionspreise nicht so stark erhöhen wie ohne Anpassungsmaßnahmen: Durch die Investitionen werden die Agrarbetriebe unter den Klimawandelbedingungen leistungs- und wettbewerbsfähiger und folgen nicht vollständig den Preissteigerungen bei den Importpreisen. Die Investitionskosten werden jedoch eingepreist, sodass die Preise gegenüber dem Basisverlauf höher ausfallen.

Forstwirtschaft

Im Bereich der Wald- und Forstwirtschaft gibt es nach Renner et al. (2021) bereits zahlreiche Anpassungsinstrumente und -maßnahmen, von denen viele in APA III beschlossen wurden. Zahlreiche Maßnahmen beziehen sich auf die Baumartenzusammensetzung und werden ihre Wirksamkeit erst langfristig und allmählich entfalten. Daneben ist auch der Bereich Wissen mit Maßnahmen zu Forschung und Verbesserung der Wissensgrundlage nicht direkt im Modell darstellbar. Gleiches gilt für Maßnahmen, die auf einen besseren Informationsaustausch bzw. vermehrte Informationsweitergabe zwischen Waldbesitzern abzielt.

Wie bereits bei der Landwirtschaft wird hier deshalb ebenfalls auf investive Anpassungsmaßnahmen fokussiert. Es wird unterstellt, dass Investitionen in neue Ausrüstungen und sonstige Anlagen getätigt werden, welche einerseits helfen, die forstwirtschaftliche Infrastruktur gegenüber dem Klimawandel zu verbessern sowie andererseits dabei unterstützen, Folgen von Extremwetterereignissen schneller zu bewältigen, um weitere Schäden durch Schädlingsbefall zu vermeiden. Genauer wird angenommen, dass die preisbereinigten Investitionen in sonstige Anlagen das durchschnittliche jährliche Wachstum der letzten 30 Jahre in etwa wieder erreichen und die Investitionen in neue Ausrüstungen das der letzten zehn Jahre. Dadurch nehmen die Investitionen in neue Ausrüstungen und sonstige Anlagen preisbereinigt gegenüber dem Basismodell wieder zu. 2050 liegen die Investitionsausgaben um durchschnittlich 0,3 % bis 5,2 % über dem Basisverlauf ohne Klimawandel. Bei den Produktionspreisen wird unterstellt, dass wie bei der

Landwirtschaft nur die Investitionskosten eingepreist werden und es zu keinen extra Preissteigerungen kommt.

Gebäude und Infrastruktur

Tabelle 15 im Anhang enthält die in der KWRA 2021 aufgeführten Anpassungsmaßnahmen für die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“. Die im APA III beschlossenen Anpassungsmaßnahmen für diese Klimawirkung sind insbesondere den Dimensionen Regulierung, Wissen und Technologien zuzurechnen (Hochwassergefahrenkarten; klimafeste Ausgestaltung bestehender technischer Normen und Regelwerke im Bauwesen; Bautechnische Lösungen für klimaangepasstes Bauen). Ein Geoinformationssystem, welches sich bereits in der Entwicklung und Umsetzung befindet, kann in Zukunft dabei helfen, eine Risikoabschätzung von zukünftigen Klimafolgen für Immobilien abzugeben, jedoch ohne eine Handlungsverpflichtung auszusprechen. Auch bei den weiterreichenden Anpassungsmaßnahmen stehen regulative und technische Optionen im Vordergrund (Ausweisung hochwassergefährdeter Standorte; Nutzungskonzepte für Gebäude; Notfallpläne; Naturgefahrengutachten beim Bau; Ausbau von Hochwasserschutzdeichen; Errichtung permanenter oder Verwendung mobiler Hochwasserschutzwände). Die genannten Anpassungsoptionen eignen sich nur in einem geringen Maße dazu, in ein ökonomisches Modell implementiert und untersucht zu werden. Auch die Ebene der Akteure (Bund, Länder, Kommunen, Hauseigentümer) unterscheidet sich, sodass unterschiedliche Analyseebenen im ökonomischen Modell vorhanden sein müssten. Die Kosten und insbesondere die Erträge der jeweiligen Anpassungsmaßnahmen lassen sich darüber hinaus nicht eindeutig quantifizieren.

In einem ökonomischen Modellrahmen lassen sich insbesondere solche Anpassungsmaßnahmen gut abbilden, denen konkrete Investitionspfade zugrunde gelegt werden können bzw. die monetäre Entscheidungen und Handlungen mit sich bringen. So lassen sich als weitere Anpassungsmaßnahmen insbesondere bautechnische Lösungen für klimaresilientes, speziell auch hochwasserangepasstes Bauen für die Modellanalyse heranziehen, welche sich ohne Schwierigkeiten in der Realität umsetzen lassen, jedoch auch mit nicht zu vernachlässigen Kosten verbunden sind (vgl. Voß et al. 2021). Dazu zählen z.B. wasserbauliche Maßnahmen, Deichbau, Hochwasserrückhaltebecken, Überflutungsflächen oder auch Polder. Bei den genannten baulichen Anpassungsmaßnahmen ist die Anpassungsdauer sehr hoch. Ebenfalls im Modell abbildbar und mit kurzfristiger Umsetzung ist der Abschluss von Versicherungen mit Abdeckung von Elementarschäden.

Für die Modellierung wird unterstellt, dass u.a. die öffentliche Hand Investitionen in bauliche Anpassungsmaßnahmen tätigt. Es wird angenommen, dass die Investitionen erst im Jahr 2025 beginnen, da z.B. zunächst auf Studienergebnisse aus den Forschungs-Anpassungsmaßnahmen gewartet wird. Im Zeitablauf nehmen die jährlichen Investitionen langsam zu. Ausgehend von einem Niveau an jährlichen realen Investitionen in neue Bauten ohne Anpassungsmaßnahmen von etwa 25 Mrd. Euro pro Jahr erhöhen sich die Investitionen bis zum Jahr 2040 um 2 % und bis zum Jahr 2050 um weitere 2 %. Dies entspricht im Jahr 2030 etwa zusätzlichen Investitionen in Anpassung von 140 Mio. Euro, im Jahr 2040 von 500 Mio. Euro und im Jahr 2050 von 1 Mrd. Euro. Dies entspricht einem Investitionsrahmen, mit dem sich auch die im Rahmen des Forschungsprojekts

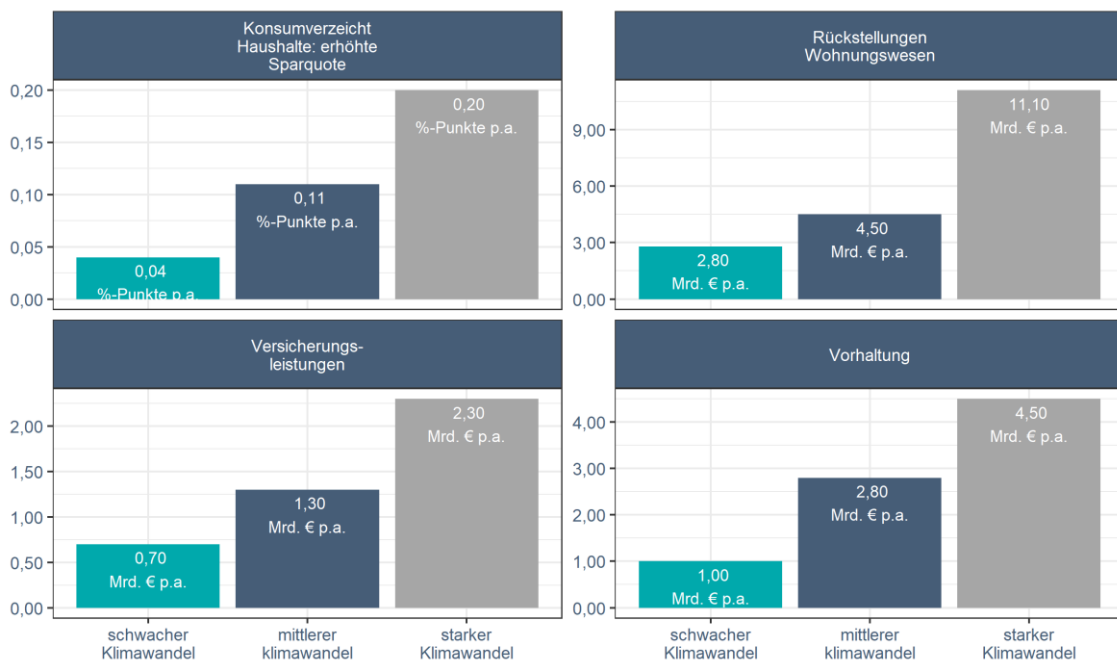
von Lehr et al. (2020) in der zusammengetragenen Datenbank enthaltenen Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld Bauwesen finanzieren ließen (z.B. Aufbau von zusätzlichen Regenwasserbecken; Angepasstes Design und Wartung von Brücken und Tunneln; Erhaltung und Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen; Nachrüsten von Infrastruktur gegen Niederschlagsereignisse; Begrünung von innerstädtischen Flächen und Dächern).

Neben den Investitionen der öffentlichen Hand setzen auch Unternehmen bauliche Anpassungsmaßnahmen um. Der Investitionspfad verläuft ähnlich zu dem der öffentlichen Hand. Ausgehend von einem Niveau an jährlichen realen Investitionen in neue Bauten ohne Anpassungsmaßnahmen von etwa 300 Mrd. Euro pro Jahr erhöhen sich die Investitionen bis zum Jahr 2040 um 2 % und bis zum Jahr 2050 um weitere 2 %. In der gesamten Ökonomie ergeben sich so zusätzliche Investitionen in bauliche Anpassungsmaßnahmen im Jahr 2030 in Höhe von 1,8 Mrd. Euro, im Jahr 2040 in Höhe von 5,6 Mrd. Euro und im Jahr 2050 von 10 Mrd. Euro.

Zusätzlich zu den baulichen Investitionen können auch Investitionen in neue Ausrüstungen angenommen werden. Die genannten Fluttore und andere Hochwasserschutz-ausrüstung können ein Beispiel für solche Investitionen sein. Für die Modellierung wird unterstellt, dass sich die Investitionen in neue Ausrüstungen ab dem Jahr 2025 bis zum Jahr 2040 um 2 % erhöhen und bis zum Jahr 2050 um weitere 2 % erhöhen. Dies entspricht zusätzlichen Investitionen im Jahr 2040 von etwa 7 Mrd. Euro und im Jahr 2050 von 12,5 Mrd. Euro.

Neben diesen Investitionen in Bau und Ausrüstung erhöht sich auch die Nachfrage nach Versicherungen mit Abdeckung von Elementarschäden um jährlich 2 %.

Abbildung 24: Quantifizierung der durch Schäden an Gebäuden und Infrastruktur ausgelösten Folgewirkungen- Anpassungsszenario



Quelle: eigene Darstellung

Entscheidend für die Betrachtung der volkswirtschaftlichen Folgekosten ist die Einschätzung des Ertrags, der sich durch geringer ausfallende Schäden bei zukünftig auftretenden klimabedingten Extremereignisse zeigt. Hierzu lassen sich jedoch nur vage Vermutungen anstellen, da dieser Ertrag von vielen unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängt. Im vorliegenden Fall reduzieren sich die jeweils in den Klimaszenarien eingestellten Effekte auf das Zurückhalten von Geldmitteln bei Versicherungen, im Wohnungswesen, privaten Haushalten und Unternehmen. Der Ertrag stellt sich jedoch erst nach einer gewissen Zeit ein und erhöht sich langsam, da zunächst erste Investitionen in bauliche Anpassungsmaßnahmen und Ausrüstung getätigt werden müssen, ehe sich ein Sicherheitsgefühl bei Haushalten und Unternehmen einstellen kann, welches sich schließlich in geringerer Vorhaltung von finanziellen Mitteln äußern kann.

Binnenschifffahrt

Die Sensitivität von Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen bei Niedrigwasser ist von der Fahrrinnenbreite und -tiefe, dem Vorhandensein von Stauhaltung und dem Gewässerzustand abhängig. Möglichkeiten zur Anpassung liegen in der Weiterentwicklung von Vorhersagesystem, der Flottenstruktur und Schiffstechnik oder auch der flussbaulichen Optimierung (Voß et al. 2021). Die aufgeführten Anpassungsmaßnahmen und -instrumente aus APA III umfassen vor allem die Fortführung und Vertiefung von Forschungs- und Koordinationsprojekten, die bereits heute durchgeführt werden. Für eine weiterreichende Anpassung kommen einerseits ein höherer Umsetzungsgrad der Maßnahmen sowie andererseits Impulse für die betroffenen Wirtschaftsbereiche in Frage. Voß et al. (2021) zeigen Möglichkeiten für finanzielle Anpassungsinstrumente, flussbauliche Maßnahmen sowie Anpassung der Wasserbewirtschaftung auf. Während sich einzelne Maßnahmen auch im Bereich von weniger als zehn Jahren umsetzen lassen, liegen insbesondere flussbauliche Maßnahmen und Anpassungen der Wasserbewirtschaftung im Bereich von bis zu 50 Jahren. Die Quantifizierung von Kosten und Ertrag der einzelnen Anpassungsmaßnahmen und Wirkungen ist komplex, zudem treten die Wirkungen der Anpassungen durch die Anpassungsdauer der umfassenden Maßnahmen von bis zu 50 Jahren erst in der fernerer Zukunft ein. Es erfolgt in dieser Untersuchung daher keine Quantifizierung eines Klimaanpassungsszenarios für die Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen bei Niedrigwasser. Dies bedeutet jedoch ausdrücklich nicht, dass in diesem Bereich keine Anpassung benötigt wird. Im Gegenteil: Durch das starke Klimarisiko zur Mitte des Jahrhunderts und insbesondere auch zum Ende des Jahrhunderts und der langen Anpassungsdauer ist die Fortführung von Klimaanpassung besonders notwendig.

Gesundheitswesen

Für die Klimawirkung „Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“ ist in der KWRA 2021 keine detaillierte Auflistung zu Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten hinterlegt, jedoch für die Klimawirkung „Hitzebelastung“, dessen Auswirkungen auf die Krankenhauseinweisungen in dieser Analyse betrachtet wurden (Wolf et al. 2021). Die aufgeführten Anpassungsmaßnahmen aus APA III umfassen vor allem Bewusstseinsbildung, weitere Forschung und Monitoring. Als weiterreichende Anpassung werden die Förderung der Erstellung von Hitzeaktionsplänen, Maßnahmen zum Schutz besonders vulnerabler Gruppen und ein flächendeckendes Mortalitäts- und Morbiditätsmonitoring aufgeführt.

Der Zeithorizont dieser Anpassungsoptionen liegt überwiegend im Bereich von bis zu 10 Jahren, die Umsetzung von regional- und stadtplanerischen Konzepten liegt jedoch im Bereich von 10 – 50 Jahren. Bereits heute zeigen sich die Auswirkungen der zunehmenden Hitzebelastung auf die menschliche Gesundheit, bis zur Mitte des Jahrhunderts wurde die Klimawirkung im pessimistischen Fall sogar mit einem hohen Risiko bewertet, sodass hier dringender Handlungsbedarf vorliegt.

Im Anpassungsszenario für das Gesundheitssystem wird unterstellt, dass Hitzewarnsysteme weiter verstetigt werden und zudem Informations- und Beratungsmaßnahmen sowie investive Maßnahmen zur Reduktion der Hitzebelastung umgesetzt werden. Illustrativ sei hier das Förderprogramm „Klimaanpassung in sozialen Einrichtungen“ genannt, welches mit 150 Mio. Euro für die Jahre 2020-2023 mit drei Förderschwerpunkten „Beratung und Konzepte“, „investive Maßnahmen“ sowie „Kampagnen und Weiterbildung“ aufgelegt wurde. Die Kosten und Nutzen von Hitzewarnsystemen sind in Tröltzsch et al. (2012) dargestellt. Angenommen wird auf dieser Basis, dass die Umsetzung der Maßnahmen sofort beginnt und durch die Maßnahmen die Auswirkungen auf das Gesundheitssystem um 30 % reduziert werden können.

Forschung und bauplanerische Maßnahmen

Anpassung an den Klimawandel kann auch darin bestehen, Forschung voranzutreiben und so neues Wissen zu generieren, welches zukünftig auch dabei helfen kann, sich besser an den Klimawandel anzupassen. Auch die Entwicklung von neuen Technologien kann vorangetrieben werden. Zusätzlich werden bauplanerische Maßnahmen umgesetzt, um Bauten in Zukunft klimaresilient zu gestalten. Dazu ist der Einsatz von z.B. Architekturbüros, Ingenieurbüros sowie technischen und physikalischen Beratern notwendig.

Für die Modellierung wird angenommen, dass die öffentliche Forschung bis zum Jahr 2040 stetig erhöht wird und ab dem Jahr 2040 jährlich zusätzlich 2 Mrd. Euro in Forschung investiert wird. Die zusätzlichen planerischen Maßnahmen werden durch die Branchen öffentliche Verwaltung, Hochbau, Tiefbau und Ausbau nachgefragt und erhöhen so die nachgefragten Vorleistungen aus der Branche Dienstleistungen von Architektur- und Ingenieurbüros um 20% ab dem Jahr 2040.

4.3 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE FOLGEKOSTEN: ANPASSUNGSSZENARIOEN

Ähnlich zum Vorgehen bei der Vorstellung der volkswirtschaftlichen Folgekosten bei den Schadensszenarien werden im Folgenden mögliche Folgekosten durch Anpassung an den Klimawandel zunächst nach Klimawirkungen getrennt, und anschließend in der Gesamtschau vorgestellt.

Für alle Anpassungsszenarien gilt, dass jeweils die gleichen Investitionsimpulse mit den drei Klimaszenarien (schwach, mittel, stark) kombiniert werden. Wir gehen davon aus, dass die Investitionen getätigt werden ohne Kenntnis darüber, wie stark der Klimawandel genau ausfallen wird und wie viele Extremwetterereignisse wo in welchem Ausmaß auftreten werden. Die Höhe der Investitionen bleibt also immer gleich, trifft im Modell aber auf unterschiedliche klimatische Veränderungen und Extremwetterereignisse. Zudem

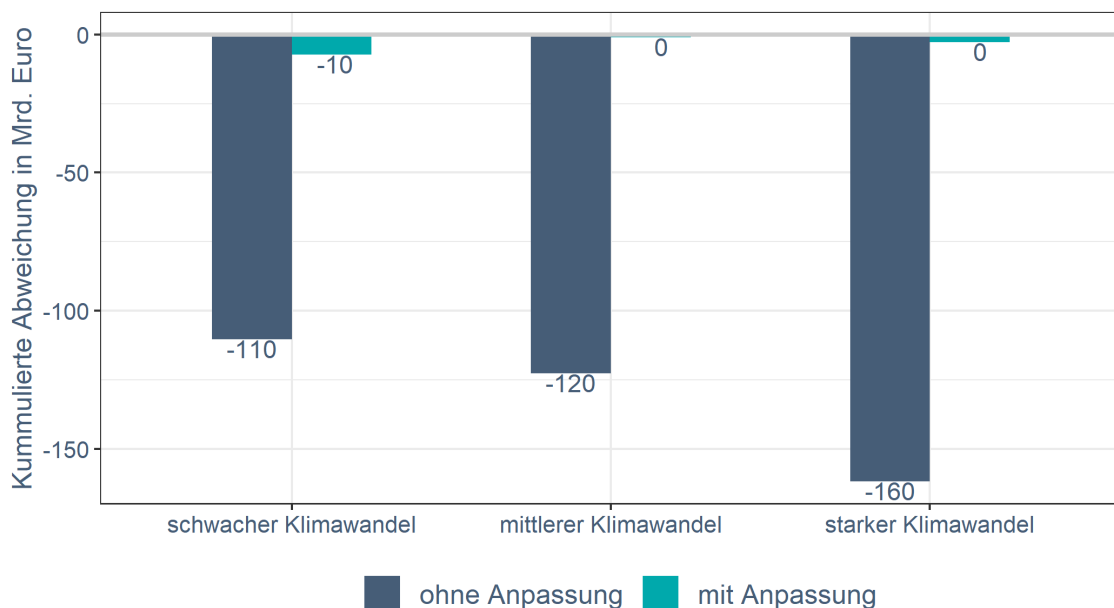
unterscheiden sich die Möglichkeiten und Arten zur Reduktion der klimawandelbedingten Schäden kaum, sodass keine grundsätzlich anderen Investitionsarten unterstellt werden können, die sich in ihren Kosten unterscheiden.

4.3.1 LANDWIRTSCHAFT

In Abbildung 25 sind die Auswirkungen der Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft für die wirtschaftliche Gesamtentwicklung dargestellt. Durch Investitionen in neue Ausrüstungen und sonstige Anlagen, welche den landwirtschaftlichen Betrieben bei der Bewältigung der Klimafolgen helfen, verringern sich die negativen Auswirkungen auf das BIP, sodass es in Summe über den Zeitraum 2022 bis 2050 fast wieder die Höhe eines BIPs ohne voranschreitenden Klimawandel erreicht.

Dieses Ergebnis hängt allerdings ganz zentral von der Preissetzung in der Landwirtschaft ab. Bleiben die Preisänderungen in ihrer Höhe unverändert wie in den Klimawandelszenarien bestehen, fallen die Kosten für das BIP noch höher aus als in den Szenarien mit Klimawandel ohne Anpassung. Unter diesen Voraussetzungen würden sich Investitionen in Anpassungsmaßnahmen also nicht lohnen.

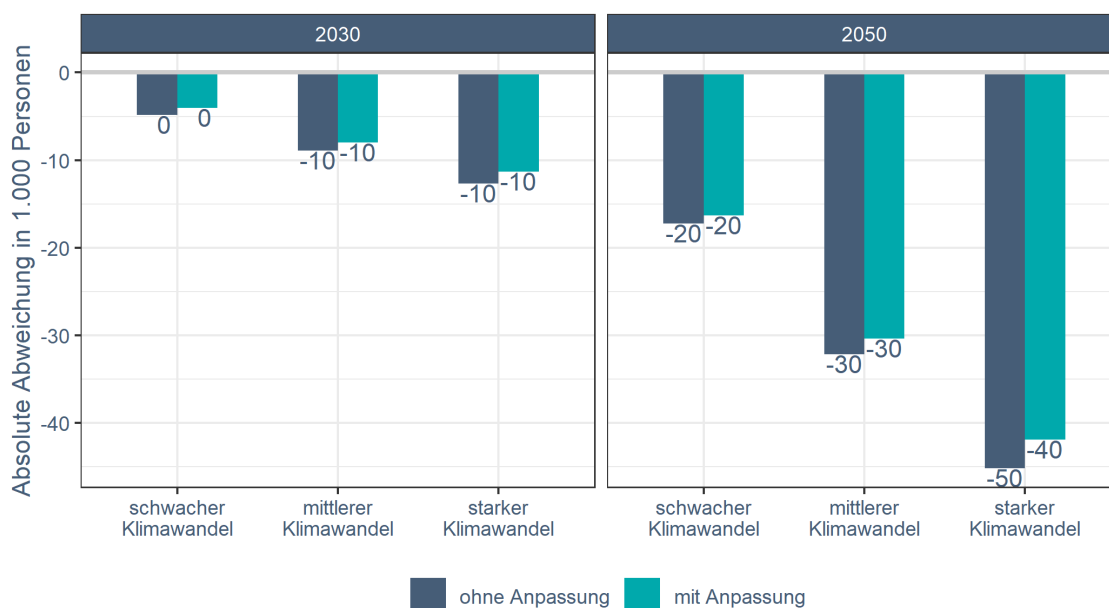
Abbildung 25: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel in der Landwirtschaft – Kumulierte Wirkungen für den Zeitraum 2022-2050 in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) auf das reale BIP für die Szenarien ohne und mit Anpassung



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Anders als bei der wirtschaftlichen Entwicklung ändert sich der negative Effekt auf den Arbeitsmarkt trotz Anpassungsmaßnahmen kaum. 2050 sind im Szenario mit Anpassung 1000 bis 3000 Personen mehr erwerbstätig als ohne Anpassung, aber immer noch ca. 20 Tsd. bis 40 Tsd. weniger als im Basisverlauf ohne voranschreitenden Klimawandel.

Abbildung 26: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel in der Landwirtschaft – Wirkung auf die Gesamtzahl der Erwerbstätigen (in Tsd., auf 10 gerundet) für 2030 und 2050



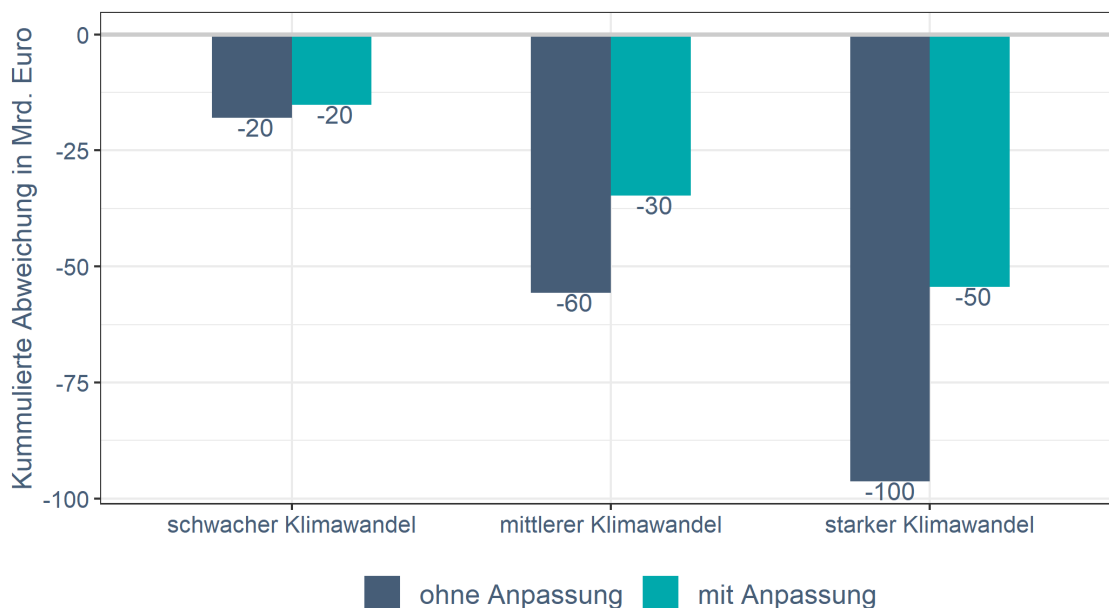
Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

4.3.2 FORSTWIRTSCHAFT

Die Anpassungsinvestitionen in der Forstwirtschaft können die negativen Auswirkungen auf das BIP verringern, aber nicht vollständig aufheben (vgl. Abbildung 27): Gegenüber dem Basisverlauf ohne voranschreitenden Klimawandel ist die wirtschaftliche Gesamtleistung aufsummiert über den Zeitraum 2022 bis 2050 um 20 bis 50 Mrd. Euro niedriger. Gegenüber den Verläufen ohne Anpassung gewinnt die Wirtschaft aber immerhin bis zu gut 40 Mrd. Euro (Abweichungen zu den Abbildungen ergeben sich durch Rundungen).

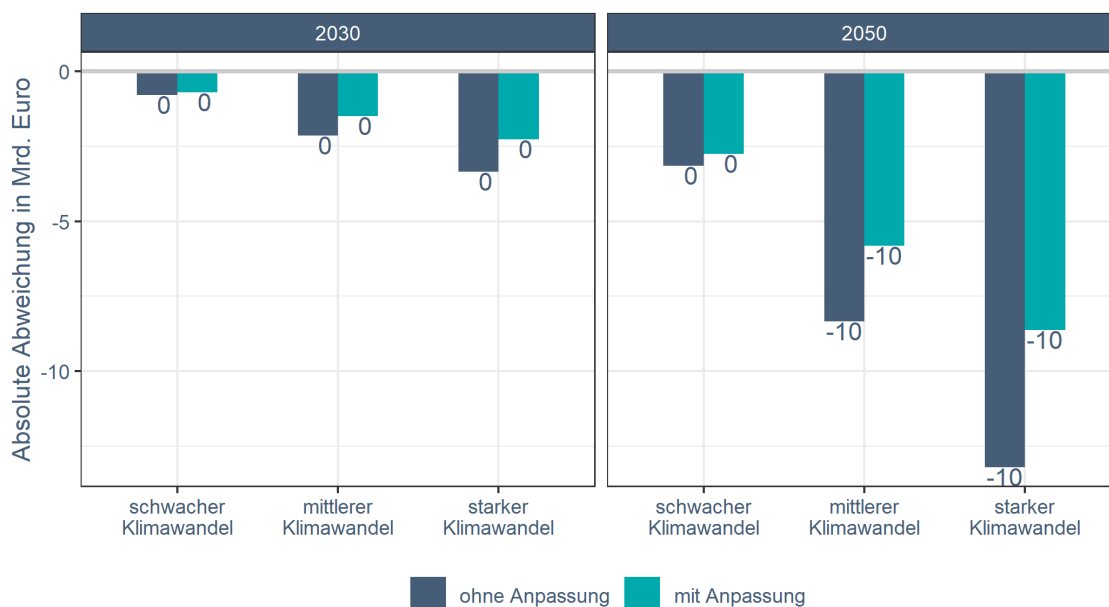
Die Differenzen bei der Erwerbstätigkeit zwischen den verschiedenen Läufen sind sehr gering (weniger als 10.000 Personen bzw. 0,01%) und werden hier nicht dargestellt. Stattdessen ist in Abbildung 28 der Effekt auf die reale Produktion zu sehen. Auch hier verbessert sich die Situation unter Anpassungsmaßnahmen, indem die Differenz zur möglichen Produktion ohne voranschreitenden Klimawandel kleiner ausfällt. 2050 können abhängig vom Grad des Klimawandels Verluste von bis zu 5 Mrd. Euro vermieden werden.

Abbildung 27: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel in der Forstwirtschaft – Kumulierte Wirkungen für den Zeitraum 2022-2050 in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) auf das reale BIP für die Szenarien ohne und mit Anpassung



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 28: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel in der Forstwirtschaft – Wirkung auf die reale Produktion (in Mrd. Euro, auf 10 gerundet) für 2030 und 2050



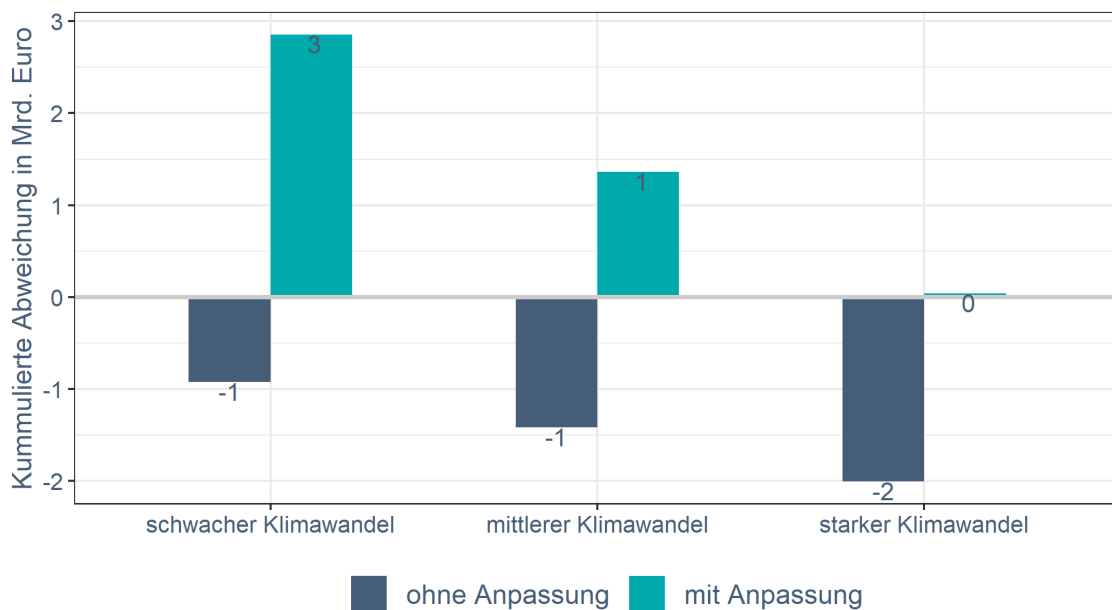
Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

4.3.3 GESUNDHEITSSYSTEM

Abbildung 29 zeigt die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen des Anpassungsszenarios im Gesundheitssystem. Bei den Szenarien für schwachen sowie der mittleren

Klimawandel zeigen sich neben den positiven Effekten für die menschliche Gesundheit auch positive gesamtwirtschaftliche Effekte durch die Investitionen in Ausrüstung und Bau sowie Warn- und Informationssysteme. Bei dem Szenario mit schwachem Klimawandel liegt die kumulierte Wirkung auf das BIP bei rund 3 Mrd. Euro, bei dem mittleren Klimawandel bei rund 1 Mrd. Euro bis 2050. Bei dem Szenario mit starkem Klimawandel lassen sich mit Anpassung die negativen Effekte gerade ausgleichen. Durch die Anpassungsinvestitionen ergeben sich zudem geringe Zuwächse bei der Beschäftigung.

Abbildung 29: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel im Gesundheitssystem – Kumulierte Wirkungen auf das reale BIP für die Szenarien ohne und mit Anpassung für den Zeitraum 2022-2050 in Mrd. Euro, gerundet



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

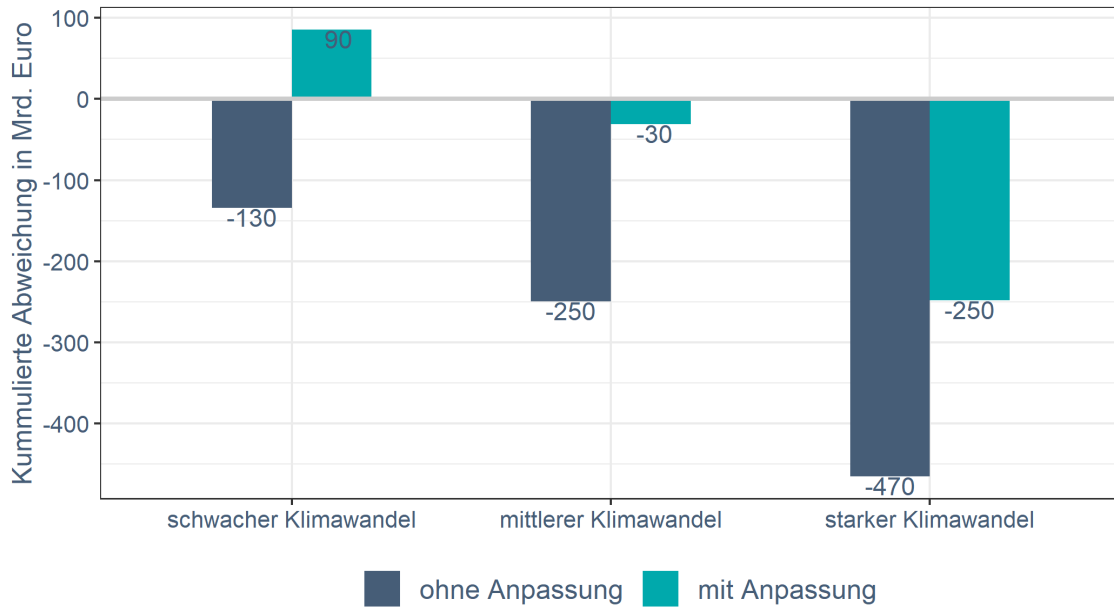
4.3.4 GEBÄUDE UND INFRASTRUKTUR

Abbildung 30 verdeutlicht, wie sich die im vorigen Abschnitt quantifizierten Annahmen zur Anpassung an den Klimawandel bei Gebäuden und Infrastruktur gesamtwirtschaftlich auswirken. Kumuliert über die Jahre 2022 bis 2050 beträgt der Impuls durch Anpassung etwa 220 Mrd. Euro. Bei schwachem Klimawandel kommt es durch die Umsetzung der Anpassungsaktivitäten insgesamt zu einem positiven gesamtwirtschaftlichen Effekt. Durch die Investitionen in Ausrüstung und Bau, die zusätzliche Versicherungsnachfrage sowie die damit einhergehende langsame Reduktion der Folgeschäden durch Klimawandel liegt die kumulierte Wirkung auf das BIP bei über fast 90 Mrd. Euro. Bei einer mittleren Klimaentwicklung reichen die getätigten Investitionen gerade aus, um gesamtwirtschaftlich die negativen Klimawirkungen fast auszugleichen. Bei starkem Klimawandel verbleibt trotz Anpassung ein negativer Effekt auf die Ökonomie. Die Investitionen reichen in diesem Fall nicht aus, um die Schäden stark zu reduzieren.

Auch die Beschäftigung erhält einen positiven Impuls durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen. Abbildung 31 verdeutlicht, dass sich die negativen Wirkungen auf die Beschäftigung durch die Anpassungsmaßnahmen reduzieren lassen. Insgesamt

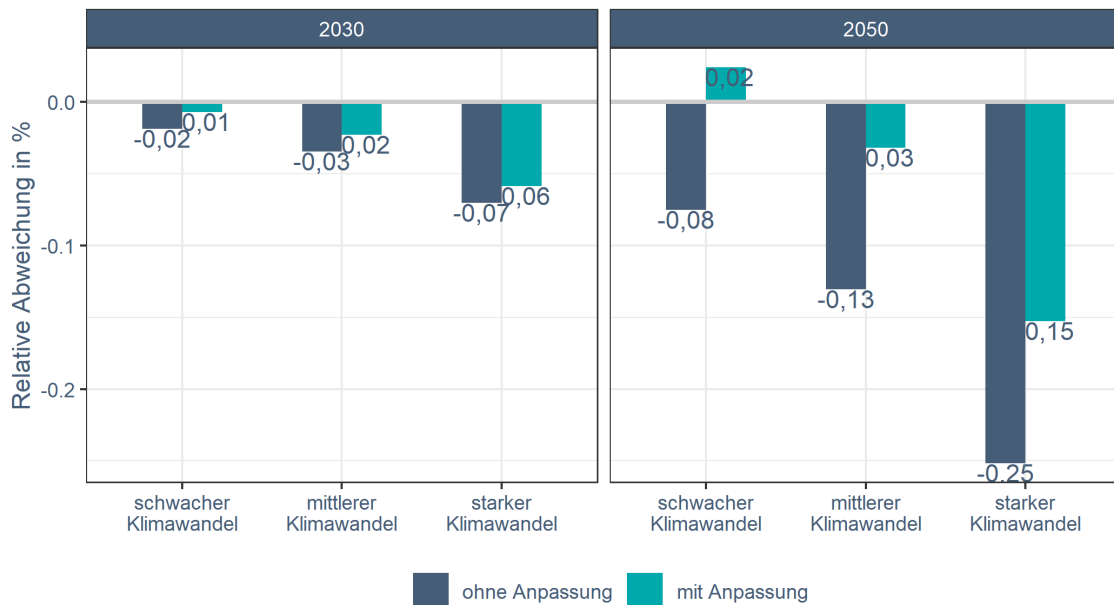
liegt die Beschäftigung um etwa 50.000 Personen höher durch die Anpassung.

Abbildung 30: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel bei Gebäuden und Infrastruktur – Kumulierte Wirkungen auf das reale BIP in Mrd. Euro für die Jahre 2022 bis 2050 für die Szenarien ohne und mit Anpassung



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 31: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung an den Klimawandel bei Gebäuden und Infrastruktur – Wirkungen auf die Beschäftigung in Prozent in den Jahren 2030 und 2050 für die Szenarien ohne und mit Anpassung



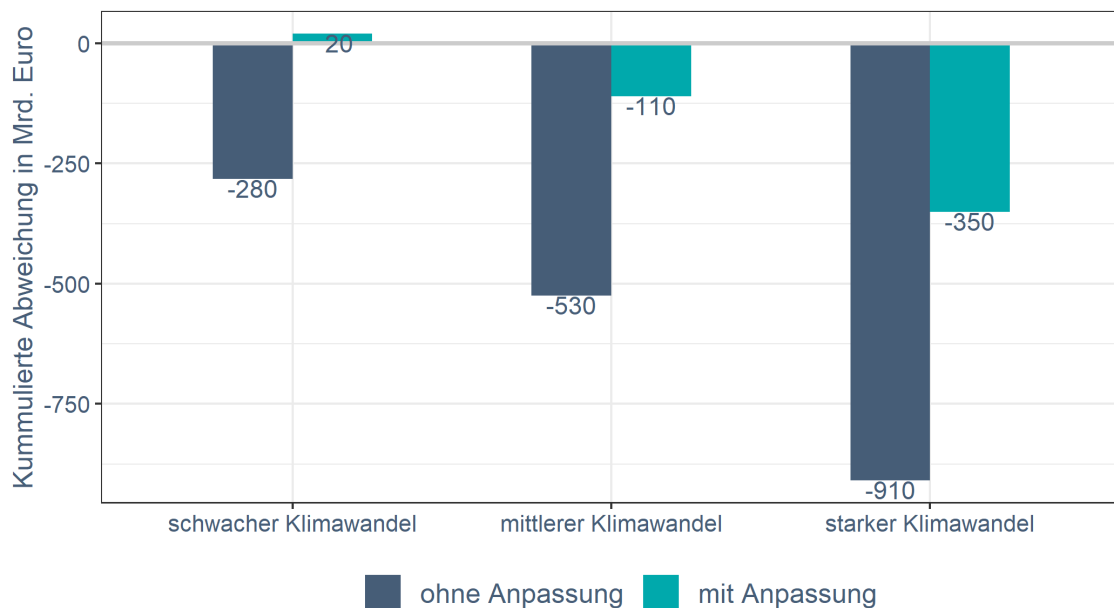
Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

4.3.5 FORSCHUNG UND BAUPLANERISCHE MASSNAHMEN

Die zusätzlichen Ausgaben für öffentliche Forschung haben einen positiven Impuls auf die Wirtschaft. Insbesondere der Produktionswert der Branche Forschung und Entwicklung erhöht sich, was wiederum zu mehr Beschäftigung führt. Die zusätzlichen bauplanerischen Maßnahmen wirken sich hingegen negativ aus. Zwar werden vermehrt die Dienstleistungen von Architekten und Ingenieuren nachgefragt, was den Produktionswert dieser Branche steigert. Jedoch erhöhen die zusätzlich nachgefragten Dienstleistungen auch die Kosten für neue Bauten und das sowohl im Hochbau, Tiefbau und beim Ausbau. Diese gestiegenen Kosten führen zu höheren Preisen, sodass insgesamt die Investitionen in neue Bauten sinken. Dies führt unmittelbar zu einem negativen Impuls auf das BIP. Kumuliert über die Jahre 2022 bis 2050 ergibt sich so ein negativer Effekt auf das BIP durch die zusätzlichen bauplanerischen Maßnahmen in Höhe von -14 Mrd. Euro, die zusätzlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung haben einen kumulierten BIP-Effekt in Höhe von 23 Mrd. Euro.

4.3.6 GESAMTSCHAU DER VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN FOLGEKOSTEN DURCH ANPASSUNG

Abbildung 32: Volkswirtschaftliche Folgen durch Anpassung – Kumulierte Wirkung auf das reale BIP in Mrd. Euro (auf 10 gerundet) für den Zeitraum 2022-2050, 2050



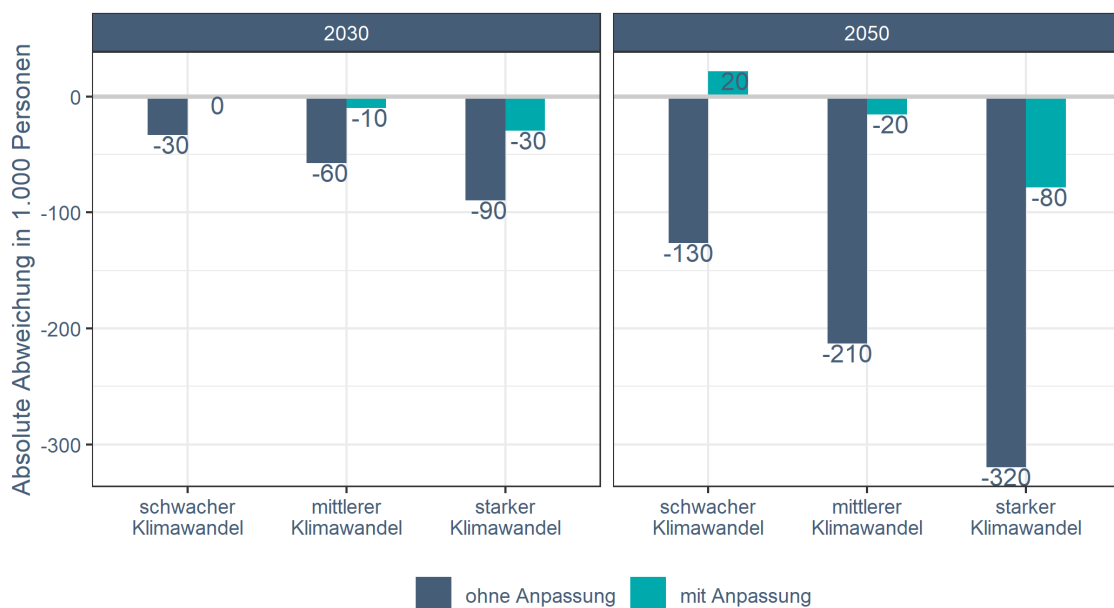
Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Abbildung 32 verdeutlicht, wie sich die oben im Detail vorgestellten Wirkungen der Anpassungsmaßnahmen insgesamt auf die deutsche Volkswirtschaft auswirken. Die bereits in Kapitel 3.2.6.1 dargestellten kumulierten negativen Effekte der Klimawirkungen ohne Anpassung betragen 280 Mrd. Euro bei schwachem Klimawandel, 530 Mrd. Euro bei mittlerem Klimawandel und 910 Mrd. Euro bei starkem Klimawandel. Durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen ergeben sich zum einen positive Wirkungen auf das BIP durch zusätzliche Investitionen und zum anderen durch eine Reduktion der

Schäden durch Klimawandel. Bei schwachem Klimawandel ergibt sich insgesamt ein positiver Effekt auf das kumulierte BIP, welcher etwa 20 Mrd. Euro beträgt. Bei mittlerem Klimawandel kann der negative Effekt auf das kumulierte BIP auf 110 Mrd. Euro abgemildert werden, bei starkem Klimawandel auf 350 Mrd. Euro. Es muss festgehalten werden, dass die Anpassung an den Klimawandel nicht dazu führt, dass keine Schäden durch Klimawandel mehr auftreten, sondern diese nur reduziert werden können. Dementsprechend entstehen auch bei schwachem Klimawandel weiterhin Schäden durch Klimawandel, jedoch überwiegen die positiven Investitionsimpulse die negativen Wirkungen durch Klimawandel.

Die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen wirken sich positiv auf die Produktionsaktivität in der Volkswirtschaft aus, was wiederum einen positiven Effekt auf die Zahl der Erwerbstätigen hat. Abbildung 33 verdeutlicht im Vergleich zu den Klimaszenarien ohne Anpassung, wie sich die Zahl der Erwerbstätigen in den Jahren 2030 und 2050 durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen ändert. In Abhängigkeit der Umsetzungsgeschwindigkeit der Anpassungsmaßnahmen reagiert auch die Zahl der Erwerbstätigen. Während im Jahr 2030 die Zahl der Erwerbstätigen durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen weniger negativ ausfällt, kommt es im Jahr 2050 bei schwachem Klimawandel sogar zu einem positiven Effekt. Aber auch bei starkem Klimawandel kann die Zahl der Erwerbstätigen deutlich erhöht werden.

Abbildung 33: Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Anpassung – Wirkungen auf die Zahl der Erwerbstätigen in Tausend in den Jahren 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von PANTA RHEI

Die Gesamtschau der Wirkungen der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen auf die Ökonomie zeigt, dass Klimaanpassungsinvestitionen erwartungsgemäß positive Wirkungen auf den ökonomischen Entwicklungspfad haben. Die Szenarien und Zahlen bilden aber jeweils nur eine mögliche Entwicklung der Zukunft ab (vgl. auch Abbildung 1). Im Wechselspiel zwischen Klimawandel und Anpassung gilt es, ein

passendes Maß an Anpassung zu finden, um sich möglichst optimal an die Folgen des Klimawandels anzupassen. Der Aufbau der Szenarien kann dahingehend verändert werden, dass bei einer absehbaren pessimistischen Entwicklung des Klimawandels eine zu geringe Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen nicht ausreicht, um die zu erwartenden ökonomischen Schäden durch Klimawandel ausreichend abzufedern. Andererseits macht es keinen Sinn, das größtmögliche Maß an Anpassung zu wählen, wenn eher ein schwacher Klimawandel als wahrscheinlich angesehen wird. Der jeweils langfristige Zeithorizont einerseits bei der Entwicklung des Klimas sowie andererseits bei der Anpassungsdauer stellen eine große Herausforderung für die optimale Ausgestaltung der Anpassungspolitik in Deutschland dar. Es wird daher notwendig sein, das Geschehen immer wieder neu zu betrachten und die negativen Folgen des Klimawandels sowie die positiven Wirkungen der Investitionen in Anpassung wiederkehrend neu zu bewerten.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Der Klimawandel stellt Deutschland und die internationale Staatengemeinschaft vor Herausforderungen. Dennoch sind Klimawandelschäden und Anpassungskosten im Vergleich zu der Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen und den ökonomischen Auswirkungen von Klimaschutz bisher deutlich weniger erforscht. **Ziel des Gesamtprojektes ist es daher, das Ausmaß vergangener und zukünftiger Kosten des Klimawandels sichtbar zu machen.** Die Ergebnisse der im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführten ex-post Analysen zeigen bereits, dass in der Vergangenheit hohe ökonomische Schäden durch Hitze, Dürre, Stürme, Starkregen oder Überflutungen entstanden sind (Trenczek et al. 2022a; Trenczek et al. 2022b; Trenczek et al. 2022c). Die Klimaprojektionen lassen vermuten, dass in Zukunft mit weiter steigenden Durchschnittstemperaturen und einem vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen zu rechnen ist (Lange et al. 2020; Brienens et al. 2020), mit erheblichen Folgen für Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft. Ziel der vorliegenden Studie ist daher, die zukünftigen volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland modellgestützt zu analysieren. Die volkswirtschaftlichen Folgekosten umfassen dabei sowohl Schadens- als auch Anpassungskosten.

Die Ausführungen und Ergebnisse in dieser Studie verdeutlichen, dass die volkswirtschaftlichen Folgekosten durch den Klimawandel selbst unter den konservativen Annahmen hoch sein können. Je nach unterstellter zukünftiger Entwicklung des Klimawandels (schwach, mittel, stark) liegen die zu erwartenden kumulierten Folgekosten für den Zeitraum von 2022 bis 2050 mindestens zwischen 280 Mrd. Euro und 900 Mrd. Euro, gemessen an den kumulierten Änderungen des realen BIP. Anders ausgedrückt würden sich die durchschnittlichen jährlichen Kosten der Extremereignisse der letzten 20 Jahre (aus Trenczek et al. 2022b) bis 2050 jährlich um das anderthalb bis fünffache erhöhen. Für das Jahr 2050 bedeutet dies einen Verlust im BIP von 0,6% bis 1,8%. Dieser Verlust ist so hoch, dass die Wirtschaft nicht weiter wachsen, sondern im Gegenteil, selbst bei schwachem Klimawandel ohne Anpassung schrumpfen wird. Ein starker Klimawandel führt im Vergleich jeweils zu deutlich höheren Kosten als ein mittlerer oder schwacher Klimawandel.

Gleichzeitig implizieren manche Klimafolgen keine hohen Kosten, sondern hohe **strukturelle Veränderungen**. Die Bedeutung von Wirtschaftszweigen und die Beschäftigungsbedarfe ändern sich dadurch massiv. Dies ist beispielsweise der Fall bei der Beeinträchtigung der Binnenschifffahrt durch Niedrigwasser. Die betroffenen Unternehmen reagieren auf die gestörten Lieferverbindungen und ändern ihre Zulieferstruktur. Je häufiger und länger die Binnenschifffahrt ihre Leistungen nicht mehr zuverlässig erbringen kann, desto mehr werden die veränderten Zulieferstrukturen bleibenden Charakter annehmen. Das heißt, einige Unternehmenszweige werden sich langfristig von unsicheren Zulieferern abwenden und ihre Waren grundsätzlich über andere Transportwege beziehen. Dies bedeutet eine grundlegende Veränderung der Wirtschaft und der Art, wie das Bruttoinlandsprodukt erwirtschaftet wird. Trotz auf den ersten Blick niedriger Gesamtverluste muss sich die Frage gestellt werden, ob diese Veränderungen gewollt sind und ob das Arbeitskräfteangebot sich an die veränderten Anforderungen der Produktionsstrukturen anpassen könnte. Ein Bootsführer wird z.B. nicht ohne Weiteres einen Lkw

oder einen Güterzug bedienen können. Gleichzeitig sind Lkw-Fahrer:innen bereits jetzt intensiv umworbene und gesuchte Arbeitnehmer:innen.

Neben den wirtschaftlichen und strukturellen Effekten ergeben sich durch die Klimawandelfolgen auch **sozioökonomische Effekte**, denen vor dem Hintergrund von **Ungleichheit und Nachhaltigkeit** durchaus hohe Bedeutung beigemessen werden sollte. Die Szenario-Rechnungen zeigen, dass sich die Ungleichheit innerhalb der Gesellschaft durch die Folgen des Klimawandels deutlich verstärkt. Die sozialen Dimensionen des Klimawandels sollten deshalb eingehender untersucht werden, vor allem vor dem Hintergrund der Wirkung auf die UN-Nachhaltigkeitsindikatoren. Insbesondere die in der Szenario-Rechnung ermittelten Preissteigerungen bei den Lebensmitteln und die höhere Arbeitslosigkeit führen zu einer Verschlechterung der Indikatoren „Kein Hunger“ und „Weniger Ungleichheit“. Der Klimawandel birgt je nach Ausmaß also durchaus soziale Sprengkraft, die es zu berücksichtigen gilt.

Zusammenfassend nehmen insbesondere solche Klimawirkungen **besonders starken Einfluss** auf die Ergebnisse bzw. Kosten, die zu **nationalen und globalen Preissteigerungen** führen wie z. B. durch Ertragsausfälle in der Landwirtschaft, durch Schäden an Gebäuden und Infrastruktur infolge von Starkregen, Überschwemmungen und Flut oder durch internationale Lieferengpässe bei Zwischenprodukten und Rohstoffen. Gerade auf die global wirkenden Klimafolgen besteht jedoch nur ein eingeschränkter nationaler Einfluss. Hier stellt sich die Frage der Wirksamkeit von nationalen Anpassungsmaßnahmen. Eventuell müssen die Anpassungsmaßnahmen bei Klimawandelfolgen mit globalem Charakter international gedacht werden.

Die aus den Szenario-Berechnungen ermittelten Werte stellen, trotz ihrer Größe, jeweils untere Grenzen dar, da sich nur ausgewählte Klimawirkungen modelltheoretisch erfassen lassen, und zusätzlich zu den hier ermittelten ökonomischen Wirkungen der monetär-bewertbaren Schäden auch noch die nicht monetär-bewertbaren Schäden hinzukommen. Dadurch stellen die hier ermittelten Kosten eine konservative Abschätzung dar. Es ist also damit zu rechnen, dass die Kosten des Klimawandels noch wesentlich höher ausfallen können, als durch die Szenarien im Modellzusammenhang ermittelt. Des Weiteren sind die Unsicherheiten sowohl den Klimawandel betreffend als auch die Szenario-Annahmen zur Bewertung der Klimawandelfolgen, zum Teil sehr hoch. Obwohl die Ergebnisse vermeintlich genaue Zahlen liefern, sind sie eher als richtungsweisend zu interpretieren.

Die genannten volkswirtschaftlichen Folgekosten verdeutlichen nicht nur die Handlungsnotwendigkeiten beim Klimaschutz, sondern auch bei der Klimaanpassung. Klimaanpassungsmaßnahmen vermindern bzw. vermeiden die klimawandelbedingten Schäden und Wirkungen in der Zukunft und tragen zur Erhöhung der Klimaresilienz bei. Die eigentlich zur Reparatur der entstandenen Schäden ohne Anpassung notwendigen Mittel können daher anderweitig genutzt werden. Klimaanpassungsinvestitionen lösen zum einen ökonomische Effekte aus und tragen zum anderen idealerweise zusätzlich zu einer nachhaltigen Verbesserung bei und entfalten auch positive ökologische oder soziale Effekte. **Die Analyse der volkswirtschaftlichen Folgekosten durch Anpassung in dieser Studie untermauert die positive Wirkung von Anpassung auf die Ökonomie.** Die kumulierten Effekte auf das BIP sowie die Beschäftigung fallen weniger stark negativ

aus. Zusätzliche Investitionen in Bauten und Ausrüstungen können die negativen ökonomischen Folgen durch Klimawandel kompensieren oder bei einer optimistischen Klimaentwicklung sogar überkompensieren. Die Zahl der Beschäftigten kann durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen jeweils gesteigert werden.

Die Ermittlung der Folgen eines schwachen, mittleren und starken Klimawandels erfolgte modellgestützt durch Szenario-Analysen mit dem makro-ökonomischen Input-Output-Modell INFORGE/PANTA RHEI. Die Szenario-Ergebnisse stellen dabei keine Prognosen oder exakten Vorhersagen dar, sondern vermitteln vielmehr einen Eindruck, welche Folgen der Klimawandel entfalten kann. Zur Ermittlung der Folgekosten des Klimawandels erfolgte die **Auswahl einzelner Klimawirkungen** auf Basis der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021. Relevante Auswahlkriterien war die Höhe des Klimarisikos, die volkswirtschaftliche Relevanz sowie die mögliche Quantifizierbarkeit und Abbildbarkeit der Klimawirkungen in einem makroökonomischen Modell. Zudem wurden Klimawirkungen aufgenommen, bei denen von einem besonders hohen Interesse oder hohen volkswirtschaftlich relevanten Effekten auszugehen war. Insgesamt umfassten die Klimawirkungen die folgenden Punkte:

- Ertragsausfälle in der Landwirtschaft
- Holzertrag in der Forstwirtschaft
- Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen
- Beschädigung oder Zerstörung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste
- Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser
- Schiffbarkeit von Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser) und Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen
- Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)
- Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

Die genannten Klimawirkungen wurden in einem ersten Schritt in ökonomische Wirkungen übersetzt und quantifiziert. Auf dieser Basis erfolgte im Anschluss die modellbasierte Abschätzung der volkswirtschaftlichen Folgekosten. Die volkswirtschaftlichen Folgekosten gehen dabei über die augenscheinlich messbaren, direkten klimawandelbedingten Schäden hinaus. Während einem defekten Industriegebäude oder defekter Infrastruktur zunächst ein Wert zugerechnet werden kann, den sein Wiederaufbau kosten würde, resultieren aus der defekten Infrastruktur oder defekten Gebäuden weitere Wirkungen (eingeschränkte Produktionsmöglichkeiten, unterbrochene Lieferketten, etc.). Heiße Temperaturen und Dürre sorgen nicht nur für Ertragsausfälle in der Landwirtschaft, sondern zu steigenden Preisen, welche wiederum an nachgelagerte Stufen wie die Nahrungsmittelindustrie weitergegeben werden und dort für steigende Kosten, höhere Preise, Anpassungen bei der Produktion und einem geänderten Konsumverhalten führen. Erst die Gesamtschau der direkten Wirkungen sowie der daraus folgenden indirekten und induzierten Wirkungen geben ein fast vollständiges Bild über die volkswirtschaftlichen Folgekosten. Immer noch nicht enthalten sind allerdings Kosten und Wirkungen, die sich nicht in monetäre Werte übertragen lassen bzw. in Werte, die in ökonomischen Modellzusammenhängen abgebildet werden können. Dies betrifft z.B. Hitzetote oder den Verlust an Artenvielfalt.

Eine hohe Hürde für die modellgestützte Analyse von volkswirtschaftlichen Folgekosten stellt insbesondere die Übersetzung und Quantifizierung der jeweiligen Klimawirkungen und Anpassungsmaßnahmen für die Modellierung dar. Für die Berechnung der möglichen Schäden für die Volkswirtschaft muss zunächst von der Entwicklung des Klimas auf die Entwicklung, Häufigkeit und Intensität von z.B. Extremwetterereignissen geschlossen werden. Je nach Ort können die dadurch verursachten Schäden unterschiedlich hoch ausfallen, was **hohe Unsicherheiten bei der Abschätzung potenzieller Schäden** mit sich bringt. Noch schwieriger ist die Quantifizierung des Ertrages von Anpassungsmaßnahmen. Während sich die Kosten relativ leicht ermitteln lassen (z.B. Investitionen in Bauten und Ausrüstungen, Ausgaben für Forschung und Entwicklung), ist es insbesondere schwierig, die Erträge durch die Anpassungsmaßnahmen genau zu beziffern oder abzuschätzen. Dies ist für eine Gesamtschau der volkswirtschaftlichen Folgekosten jedoch unabdingbar. Gerade die mögliche Reduktion der klimawandelbedingten Schäden ist eine wesentliche Motivation für Anpassungen. Hier besteht also dahingehend weiterer Forschungsbedarf, dass man zusätzlich zu den zu erwartenden Kosten von Anpassungsmaßnahmen auch den erwarteten Nutzen beziffert. Dies kann jedoch nur von ausgewiesenen (Sektor-)Experteninnen und -experten vorgenommen werden.

Für eine Gesamtschau der volkswirtschaftlichen Folgekosten ist es darüber hinaus erforderlich, dass auch die nicht-monetären Schäden und Wirkungen des Klimawandels bewertet werden müssen, um ein Gesamtbild der Schäden für die Volkswirtschaft abbilden zu können. Diese Bewertung ist jedoch ebenfalls mit hohen Unsicherheiten und subjektiven Einschätzungen verbunden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Bewertung der nicht materiellen Schäden schnell zu hohen Schadenssummen führen kann, je nachdem welches Bewertungsschema dieser Bewertung zugrunde liegt.

Es bleibt insbesondere die Erkenntnis, dass zur Abschätzung der volkswirtschaftlichen Folgekosten für die Fülle an möglichen Klimawirkungen in Deutschland noch viel Forschungsarbeit betrieben werden muss. Aufgrund der Komplexität und der umfangreichen (Wechsel-)Wirkungen einzelner Klimawirkungen und Anpassungsmaßnahmen ergibt sich die Notwendigkeit, für einzelne Klimawirkungen und Anpassungsmaßnahmen eigene Forschungsprojekte auszuschreiben.

Hinzu kommt, dass es sich bei der Entwicklung des Klimas selbst sowie auch bei der Umsetzung von Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel um eine dynamische Lage handelt, welche von verschiedensten Faktoren beeinflusst wird und mit vielen Unsicherheiten behaftet ist. Zudem werden technologische Weiterentwicklungen auch bei Klimafolgenanpassungsinvestitionen zu beobachten sein: Bessere Bewässerungssysteme oder innovative Bauweisen werden entwickelt werden, die unter Umständen den Wirkungen des Klimawandels besser widerstehen können, als es heutige Technologien können. Daher ist es notwendig, das Geschehen immer wieder neu zu betrachten und die negativen Folgen des Klimawandels sowie die positiven Wirkungen der Investitionen in Anpassung wiederkehrend neu zu bewerten. Dafür ist ein systematisches und in den Inhalten flexibles Monitoring hilfreich, das die Entwicklungen bei Klimaschutz, Klimafolgen sowie die Effekte getroffener Klimaanpassungsmaßnahmen kontinuierlich aufzeichnet und eine Einschätzung zu Erfolgen sowie weiterem Handlungsbedarf liefert.

6 LITERATURVERZEICHNIS

Alegria, C., Roque, N., Albuquerque, T., Gerassis, S., Fernandez, P. & Ribeiro, M. M. (2020): Species Ecological Envelopes under Climate Change Scenarios – A Case Study for the Main Two Wood-Production Forest Species in Portugal. *Forests* 11 (8), S. 880. DOI: 10.3390/f11080880.

Augustynczyk, A. L. D., Hartig, F., Minunno, F., Kahle, H.-P., Diaconu, D., Hanewinkel, M. & Yousefpour, R. (2017): Productivity of *Fagus sylvatica* under climate change – A Bayesian analysis of risk and uncertainty using the model 3-PG. *Forest Ecology and Management* 401, S. 192–206. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.06.061.

Becker, L., Bernardt, F., Bieritz, L., Mönnig, A., Parton, F., Ulrich, P. & Wolter, M. I. (2022): INFORGE in a Pocket. GWS-Kurzmitteilung 2022/02. <https://www.gws-os.com/de/publikationen/gws-kurzmitteilungen/detail/inforge-in-a-pocket>.

Beillouin, D., Schauburger, B., Bastos, A., Ciais, P. & Makowski, D. (2020): Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. *Philosophical transactions of the Royal Society of London* 375 (1810). DOI: 10.1098/rstb.2019.0510.

BGR (2021): Deutschland - Rohstoffsituationsbericht 2020. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4, abgerufen am 19.05.2022.

Birkmann, J., Greiving, S. & Serdeczny, O. (2017): Das Assessment von Vulnerabilität, Risiken und Unsicherheiten. In: Brasseur, G. P., Jacob, D. & Schuck-Zöller, S. (Hg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 267–276.

Blobel, D., Tröltzsch, J., Peter, M., Bertschmann, D. & Lückge, H. (2016): Vorschlag für einen Policy Mix für den Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 19/2016, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_19_2016_vorschlag_fuer_einen_policy_mix.pdf.

BMG (2018): Arbeitsunfähigkeit: Fälle und Tage nach Diagnosen 2018 – Ergebnisse der Krankheitsartenstatistik der gesetzlichen Krankenversicherung. Bundesministerium für Gesundheit. https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Daten/3_Downloads/Statistiken/GKV/Geschaeftergebnisse/AU-Faelle_nach_Diagnosen_2018.pdf, abgerufen am 26.05.2022.

BMG (2019): Arbeitsunfähigkeit: Fälle und Tage nach Diagnosen 2019 – Ergebnisse der Krankheitsartenstatistik der gesetzlichen Krankenversicherung. Bundesministerium für Gesundheit. https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Daten/3_Downloads/Statistiken/GKV/Geschaeftergebnisse/AU_nach_Diagnosen_2019.pdf, abgerufen am 26.05.2022.

Bobb, J. F., Obermeyer, Z., Wang, Y. & Dominici, F. (2014): Cause-Specific Risk of Hospital Admission Related to Extreme Heat in Older Adults. *JAMA* 312 (24), S. 2659–2667. DOI: 10.1001/jama.2014.15715.

Boettcher, M., Gabriel, J. & Low, S. (2016): Solar Radiation Management: Foresight for Governance – Project Report. Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam. https://www.researchgate.net/profile/miranda-boettcher/publication/309007768_solar_radiation_management_foresight_for_governance_project_report, abgerufen am 30.05.2022. DOI: 10.2312/iass.2016.007.

Brasseur, G. P., Jacob, D. & Schuck-Zöller, S. (Hg.) (2017): Klimawandel in Deutschland – Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer, Berlin, Heidelberg.

Brienen, S., Walter, A., Brendel, C., Fleischer, C., Ganske, A., Haller, M., Helms, M., Höpp, S., Jensen, C., Jochumsen, K., Möller, J., Krähemann, S., Nilson, E., Rauthe, M., Razafimaharo, C., Rudolph, E., Rybka, H., Schade, N. & Stanley, K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Experten-netzwerks. https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/TFSPTBerichte/SPT101.pdf;jsessionid=EC1EB3724E45E28201E0A25DCBFD0D98.live11311?__blob=publication-File&v=8. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02.

Bubeck, P., Kienzler, S., Dillenardt, L., Mohor, G. S., Thieken, A. H., Sauer, A., Neubert, M., Blazejczak, J. & Edler, D. (2020): Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen – Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und -anpassung“, Teil 1. Hg. v. Umweltbundesamt. Climate Change 29/2020, Dessau-Roßlau.

Buth, M., Kahlenborn, W., Savelsberg, J., Becker, N., Bubeck, P., Kabisch, S., Kind, C., Tempel, A., Tucci, F., Greiving, S., Fleischhauer, M., Lindner, C., Lückenkötter, J., Schonlau, M., Schmitt, H., Hurth, F., Othmer, F., Augustin, R., Becker, D., Abel, M., Bornemann, T., Steiner, H., Zebisch, M., Schneiderbauer, S. & Kofler, C. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel – Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität. Hg. v. Umweltbundesamt. Climate Change 24. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem>.

Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J. & Johnston, F. H. (2018): Heatwave and health impact research: A global review. Health & place 53, S. 210–218. DOI: 10.1016/j.healthplace.2018.08.017.

COACCH (2019): The Economic Cost of Climate Change in Europe – Synthesis Report on Interim Results. Hg. v. Paul Watkiss, Jenny Troeltzsch, katriona mcglade und Michelle Watkiss. Policy brief by the COACCH project. <https://www.coacch.eu/wp-content/uploads/2019/11/COACCH-Sector-Impact-Economic-Cost-Results-22-Nov-2019-Web.pdf>, abgerufen am 17.05.2022.

Destatis (2021): Gesundheit – Kostennachweis der Krankenhäuser 2019. Fachserie 12, Reihe 6.3. Statistisches Bundesamt.

Destatis (2022): Wohnkosten – Anteil an Konsumausgaben privater Haushalte in Deutschland. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/380505/umfrage/wohnenanteil-an-konsumausgaben-privater-haushalte-in-deutschland/>, zuletzt aktualisiert

am 19.05.2022, abgerufen am 19.05.2022.

Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative & klimafakten.de (Hg.) (2021): Was wir heute übers Klima wissen – Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. https://www.deutsches-klima-konsortium.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Publikationen_DKK/basisfakten-klimawandel-print.pdf, abgerufen am 17.05.2022.

Die Bundesregierung (2022): Sofortprogramm Klimaanpassung – Für Klimawandel und Extremwetter vorsorgen. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/sofortprogramm-klimaanpassung-2019928>, abgerufen am 30.11.2022.

DLR, DIW & KBA (2022): Verkehr in Zahlen 2021/2022. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Flensburg.

DWD (2021): Nationaler Klimareport. 5. überarbeitete Auflage. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf?__blob=publicationFile&v=14, abgerufen am 26.05.2022.

DWD (2022a): Hitzewelle. Wetter- und Klimalexikon. Deutscher Wetterdienst. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852>, zuletzt aktualisiert am 19.05.2022, abgerufen am 19.05.2022.

DWD (2022b): Heißer Tag. Wetter- und Klimalexikon. Deutscher Wetterdienst. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101094&lv3=101162>, zuletzt aktualisiert am 26.05.2022, abgerufen am 26.05.2022.

DWD (2022c): Klimaprojektionen. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/klimaprojektionen_node.html, zuletzt aktualisiert am 07.10.2022, abgerufen am 07.10.2022.

EEA (2020): Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. European Environment Agency. EEA Reports 21/2019. <https://www.europeansources.info/record/healthy-environment-healthy-lives-how-the-environment-influences-health-and-well-being-in-europe/?print>, abgerufen am 26.05.2022. DOI: 10.2800/53670.

Elkins, S. (2005): Soziale Gerechtigkeit als umweltpolitisches Steuerungsproblem. In: Corsten, M., Rosa, H. & Schrader, R. (Hg.): Die Gerechtigkeit der Gesellschaft. 1. Aufl. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, S. 229–260.

Fritsch, U., Zebisch, M., Voß, M., Linsenmeier, M., Kahlenborn, W., Porst, L., Hölscher, L., Wolff, A., Hardner, U., Schwartz, K., Wolf, M., Schmuck, A., Schönthaler, K., Nilson, E., Fischer, H. & Fleischer, C. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 3: Risiken und Anpassung im Cluster Wasser. Hg. v. Umweltbundesamt. Climate Change 22.

GDV (2021): Naturgefahrenreport 2021 – Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Berlin.

GDV (2022): Ein Jahr nach der schadenreichsten Naturkatastrophe in Deutschland: Versicherer ziehen Bilanz zur Schadenregulierung. <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/ein-jahr-nach-der-schadenreichsten-naturkatastrophe-in-deutschland-versicherer-ziehen-bilanz-zur-schadenregulierung-85458>, abgerufen am 29.09.2022.

GDV & DWD (2019): Forschungsprojekt Starkregen – Summary. Hg. v. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. und Deutscher Wetterdienst, Berlin.

Großmann, A., Hohmann, F., Lutz, C. & Reuschel, S. (2022): Supporting Climate Resilient Economic Development in Kazakhstan. Application of the e3.kz Model to Analyze the Economy-wide Impacts of Climate Change Adaptation. Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Berlin.

GWS, Prognos & EWI (2014): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Osnabrück, Köln, Basel.

Hänsel, S., Nilson, E., Patzwahl, R., Forbriger, M., Klose, M. & Krieger, B. (2020): Einflüsse naturgefahrenbedingter Streckensperrungen auf überregionale Verkehrsströme – Verkehrsträgerübergreifende Stresstestszenarien für die Region 'Mittelrhein'. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/EXPNHS2020.2020.10.

Hartje, V., Wüstemann, H. & Bonn, A. (Hg.) (2015): Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte. Naturkapital Deutschland - TEEB DE. Technische Universität Berlin; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Berlin, Leipzig.

Helmrich, R., Maier, T., Mönnig, A., Wolter, M. I. & Zika, G. (2022): Wenn das Morgen heute beginnt – Herausforderungen für Projektionen in Zeiten des Umbruchs, der Koalitionsvertrag und seine Herausforderungen. GWS-Kurzmitteilung, QuBe-Essay 1/2022, Osnabrück.

Hirschfeld, J., Schulze, N. & Hock, A.-L. (2021a): Priorisierung einzelner Schadens- und Kostendimensionen der Folgen des Klimawandels – Kurzstudie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin, abgerufen am 26.05.2022.

Hirschfeld, J., Schulze, N., Hock, A.-L., Trenczek, J., Flaute, M., Eiserbeck, L., Sandhövel, M., Reuschel, S., Lühr, O., Hoffmann, E. & Dehnhardt, A. (2021b): Kostendimensionen von Klimaschäden – eine systematische Kategorisierung – Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2022/Hirschfeld_et_al._2021_Kostendimensionen_von_Klimaschaeden.pdf, abgerufen am 26.05.2022.

Hübler, M. (2014): Sozio-ökonomische Bewertung von Gesundheitseffekten des

Klimawandels in Deutschland. In: Lozán, J. L., Graßl, H., Jendritzky, G., Karbe, L. & Reise, K. (Hg.): Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken - Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Aufl., S. 299–306. https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/de/gesundheitsrisiken/warnsignal_klima-gesundheitsrisiken-kapitel-4_13.pdf.

Hübler, M., Klepper, G. & Peterson, S. (2008): Costs of climate change – The effects of rising temperatures on health and productivity in Germany. *Ecological Economics* 68 (1-2), S. 381–393. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.04.010.

IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hg. v. Masson-Delmotte, V. P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge. DOI: 10.1017/9781009157896.

Kahlenborn, W., Linsenmeier, M., Porst, L., Voß, M., Dorsch, L., Lacombe, S., Huber, B., Zebisch, M., Bock, A., Klemm, J., Crespi, A., Renner, K., Lutz, C., Becker, L., Ulrich, P., Distelkam, M., Behmer, J., Walter, A., Leps, N., Wehring, S., Nilson, E., Jochumsen, K., Wolf, M. & Schönthaler, K. (2021a): *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 1: Grundlagen*. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 20/2021.

Kahlenborn, W., Porst, Luise, Voß, M., Fritsch, U., Renner, K., Zebisch, M., Wolf, M., Schönthaler, K. & Schaus, I. (2021b): *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Kurzfassung*. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 26/2021.

Kahlenborn, W., Porst, L., Voß, M., Hölscher, L., Undorf, S., Wolf, M., Schönthaler, K., Crespi, A., Renner, K., Zebisch, M., Fritsch, U. & Schaus, I. (2021c): *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 6: Integrierte Auswertung - Klimarisiken, Handlungserfordernisse und Forschungsbedarfe*. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 25/2021.

Karlsson, M. & Ziebarth, N. R. (2018): Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany. *Journal of Environmental Economics and Management* 91, S. 93–117. DOI: 10.1016/j.jeem.2018.06.004.

Klauber, H. & Koch, N. (2021): Individuelle und regionale Risikofaktoren für hitzebedingte Hospitalisierungen der über 65-Jährigen in Deutschland. In: Günster, C., Klauber, J., Robra, B.-P., Schmuker, C. & Schneider, A. (Hg.): *Versorgungs-Report. Klima und Gesundheit*. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Berlin, S. 63–78.

Knittel, N., Jury, M. W., Bednar-Friedl, B., Bachner, G. & Steiner, A. K. (2020): A global analysis of heat-related labour productivity losses under climate change—implications for Germany's foreign trade. *Climatic Change* 160 (2), S. 251–269. DOI: 10.1007/s10584-020-02661-1.

Lange, S., Volkholz, J., Geiger, T., Zhao, F., Vega, I., Veldkamp, T., Reyer, C. P. O.,

Warszawski, L., Huber, V., Jägermeyr, J., Schewe, J., Bresch, D. N., Büchner, M., Chang, J., Ciais, P., Dury, M., Emanuel, K., Folberth, C., Gerten, D., Gosling, S. N., Grillakis, M., Hanasaki, N., Henrot, A.-J., Hickler, T., Honda, Y., Ito, A., Khabarov, N., Koutroulis, A., Liu, W., Müller, C., Nishina, K., Ostberg, S., Müller Schmied, H., Seneviratne, S. I., Stacke, T., Steinkamp, J., Thiery, W., Wada, Y., Willner, S., Yang, H., Yoshikawa, M., Yue, C. & Frieler, K. (2020): Projecting Exposure to Extreme Climate Impact Events Across Six Event Categories and Three Spatial Scales. *Earth's future* 8 (12). DOI: 10.1029/2020EF001616.

Lehr, U., Edler, D., Ulrich, P., Blazejczak, J. & Lutz, C. (2019): Beschäftigungschancen auf dem Weg zu einer Green Economy – szenarienbasierte Analyse von (Netto-) Beschäftigungswirkungen. *Umwelt, Innovation, Beschäftigung* 03/2019, Dessau-Roßlau.

Lehr, U., Flaute, M., Ahmann, L., Nieters, A., Hirschfeld, J., Welling, M., Wolff, C., Gall, A., Kersting, J., Mahlbacher, M. & Möllendorff, C. von (2020): Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 43/2020, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_11_27_cc_43_2020_politikinstrumente-klimaanpassung.pdf, abgerufen am 26.05.2022.

Lehr, U., Ulrich, P., Lutz, C., Thobe, I., Edler, D., O'Sullivan, M., Simon, S., Naegler, T., Pfenning, U., Frank, P., Sakowski, F. & Bickel, P. (2015): Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland – Ausbau und Betrieb, heute und morgen. *Politikberatung kompakt* 101. DIW, Berlin. http://www.diw.de/sixcms/detail.php?id=diw_01.c.510579.de.

Lesk, C., Rowhani, P. & Ramankutty, N. (2016): Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* 529 (7584), S. 84–87. DOI: 10.1038/nature16467.

Li, Y., Guan, K., Schnitkey, G. D., DeLucia, E. & Peng, B. (2019): Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States. *Global Change Biology* 25 (7), S. 2325–2337. DOI: 10.1111/gcb.14628.

Lutz, C., Flaute, M., Lehr, U., Kemmler, A., auf der Maur, A., Ziegenhagen, I., Wunsch, M., Koziel, S., Piégsa, A. & Straßburg, S. (2018): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende. *GWS Research Report* 2018/04.

Mäkinen, H., Kaseva, J., Trnka, M., Balek, J., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Gobin, A., Olesen, J. E., Bindi, M., Ferrise, R., Moriondo, M., Rodríguez, A., Ruiz-Ramos, M., Takáč, J., Bezák, P., Ventrella, D., Ruget, F., Capellades, G. & Kahiluoto, H. (2018): Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field Crops Research* 222, S. 209–217. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.11.008.

Mönnig, A. (2016): The European Monetary Union break-up – an economic experiment on the return of the deutsche mark. *Economic Systems Research* 28, 2016 (4), S. 497–517. DOI: 10.1080/09535314.2016.1242478.

Nelson, R. & Winter, S. G. (1982): *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press, Cambridge, London.

Nilson, E., Astor, B., Fischer, H., Fleischer, C., Haurert, G., Helms, M., Hillebrand, G., Labadz, M., Mannfeld, M., Riedel, A., Schulz, D., Bergmann, L., Kikillus, A., Patzwahl, R., Rasquin, C., Schröder, M., Seiffert, R., Stachel, H., Wachler, B., Winkel, N., Höpp, S., Razafimaharo, C. & Rauthe, M. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/EXPNNE2020.2020.07.

Patankar, A. M. (2015): The exposure, vulnerability, and ability to respond of poor households to recurrent floods in Mumbai. Policy Research Working Paper Series. The World Bank. Policy Research Working Paper 7481. <http://hdl.handle.net/10986/23434>.

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

Peter, M., Guyer, M., Füssler, J., Bednar-Friedl, B., Knittel, N., Gabriel, B., Schwarze, R. & Unger, M. von (2020): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland – Abschlussbericht: Analysen und Politikempfehlungen. Hg. v. Umweltbundesamt. 15/2020.

Peter, M., Guyer, M., Füssler, J., Bednar-Friedl, B., Knittel, N., Wegener, B. G. & Schwarze, R. (2021): The transnational impacts of global climate change for Germany – Abridged version. Hg. v. Umweltbundesamt. Climate Change 03/2021.

Pfeifer, S., Rechid, D. & Bathiany, S. (2020): Klimaausblick Deutschland. Climate Service Center Germany (GERICS). <https://gerics.de/productsandpublications/factsheets/index.php.de>, abgerufen am 19.05.2022.

Philip, P., Ibrahim, C. & Hodges, C. (2021): Germany's turning point – Accelerating new growth on the path to net zero. Hg. v. Deloitte Global.

Prognos, EWI & GWS (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studie im Auftrag des BMWi, Basel, Köln, Osnabrück.

Prognos, EWI & GWS (2011): Energieszenarien 2011. Studie im Auftrag des BMWi, Basel, Köln, Osnabrück.

Prognos, EWI & GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Basel, Köln, Osnabrück.

Ren, X., Weitzel, M., O'Neill, B. C., Lawrence, P., Meiyappan, P., Levis, S., Balistreri, E. J. & Dalton, M. (2018): Avoided economic impacts of climate change on agriculture: integrating a land surface model (CLM) with a global economic model (iPETS). *Climatic Change* 146 (3-4), S. 517–531. DOI: 10.1007/s10584-016-1791-1.

Renner, K., Fritsch, U., Zebisch, M., Wolf, M., Schmuck, A., Ölmez, C., Schönthaler, K., Porst, L., Voß, M., Wolff, A. & Jay, M. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 2: Risiken und Anpassung im Cluster Land. Hg. v. Umweltbundesamt. Climate Change 21/2021, Dessau-Roßlau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_2_cluster_land_bf_211027_0.pdf, abgerufen am 30.05.2022.

Riedel, T., Nolte, C., Beek, T. aus der, Liedtke, J., Sures, B. & Grabner, D. (2021): Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien – Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Texte 174/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf, abgerufen am 26.05.2022.

Schlenker, W. & Roberts, M. J. (2009): Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (37), S. 15594–15598. DOI: 10.1073/pnas.0906865106.

Schoierer, J., Mertes, H., Deering, K., Böse-O'Reilly, S. & Quartucci, C. (2021): Hitzebelastungen im Arbeitsetting: die Sicht der Arbeitsmedizin. In: Günster, C., Klauber, J., Robra, B.-P., Schmuker, C. & Schneider, A. (Hg.): *Versorgungs-Report. Klima und Gesundheit*. MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Berlin, S. 89–104.

Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., van Diemen, R., Haughey, E., Malley, J., Pathak, M. & Pereira, J. P. (2019): Technical Summary. In: Shukla, P. R., Skea, J., Calvin Buentia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C. et al. (Hg.): *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In press, S. 35–74. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03_Technical-Summary-TS_V2.pdf.

Steininger, K. W., Bednar-Friedl, B., Formayer, H. & König, M. (2016): Consistent economic cross-sectoral climate change impact scenario analysis – Method and application to Austria. *Climate Services* 1, S. 39–52. DOI: 10.1016/j.cliser.2016.02.003.

Stöver, B., Flaute, M. & Reuschel, S. (2022): Forschungsstand und Literatur zu den volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland – Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland. Forschungsstand GWS - Institute of Economic Structures Research. Research Report.

Swain, D. L., Langenbrunner, B., Neelin, J. D. & Hall, A. (2018): Increasing precipitation volatility in twenty-first-century California. *Nature Climate Change* 8 (5), S. 427–433. DOI: 10.1038/s41558-018-0140-y.

Tei, S., Sugimoto, A., Yonenobu, H., Matsuura, Y., Osawa, A., Sato, H., Fujinuma, J. & Maximov, T. (2017): Tree-ring analysis and modeling approaches yield contrary response of circumboreal forest productivity to climate change. *Global Change Biology* 23 (12), S. 5179–5188. DOI: 10.1111/gcb.13780.

Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Naylor, R. L. & Ray, D. K. (2018): Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (26), S. 6644–

6649. DOI: 10.1073/pnas.1718031115.

Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L. & Leuschner, V. (2022a): Schäden der Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021 in Deutschland – Eine ex-post-Analyse. Projektbericht "Kosten durch Klimawandelfolgen". Hg. v. Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L. & Sandhövel, M. (2022b): Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland – Methodik und Erstellung einer Schadensübersicht. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“ – AP 2.1. Hg. v. Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L., Sandhövel, M. & Ibens, D. (2022c): Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019 – Eine ex-post-Analyse. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), im Erscheinen.

Tripathi, A., Tripathi, D. K., Kumar Chauhan, D., Kumar, N. & Singh, G. S. (2016): Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world – A review on current knowledge and future prospects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 216, S. 356–373. DOI: 10.1016/j.agee.2015.09.034.

Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M. & Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel – Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 10/2012, Dessau-Roßlau.

UBA (2021): Indikator: Heiße Tage. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>, abgerufen am 30.05.2022.

Voß, M., Kahlenborn, W., Porst, L., Dorsch, L., Nilson, E., Rudolph, E. & Lohrengel, A.-F. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 23/2021.

Wang, J., Vanga, S. K., Saxena, R., Orsat, V. & Raghavan, V. (2018): Effect of Climate Change on the Yield of Cereal Crops: A Review. *Climate* 6 (2), S. 41. DOI: 10.3390/cli6020041.

West, G. R. (1995): Comparison of Input-Output, Input-Output Econometric and Computable General Equilibrium Impact Models at the Regional Level. *Economic Systems Research* 7 (2), S. 209–227. DOI: 10.1080/09535319500000021.

WHO (2021): Heat and health in the WHO European Region – Updated evidence for effective prevention. WHO Regional Office for Europe, Kopenhagen.

Wolf, M., Ölmez, C., Schöntaler, K., Porst, L., Voß, M., Linsenmeier, M., Kahlenborn, W., Dorsch, L. & Dudda, L. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 – Teilbericht 5: Klimarisiken in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 24/2021, Dessau-Roßlau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_5_cluster_wirtschaft_gesundheit_bf_211027_0.pdf.

Wolter, M. I., Flaute, M. & Großmann, A. (2021): Volkswirtschaftlicher Ertrag der Klimafolgenanpassung – ein Wechsel der Perspektive. GWS Kurzmitteilung 2021/02, Osnabrück. <https://www.gws-os.com/de/publikationen/gws-kurzmitteilungen/detail/2021-volkswirtschaftlicher-ertrag-der-klimafolgenanpassung-ein-wechsel-der-perspektive>.

ANHANG

Tabelle 12: Klimawirkungen der KWRA 2021 nach Handlungsfeld

Biologische Vielfalt	
<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung der Vegetationsperiode und Phänologie • Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände • Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbreitung invasiver Arten • Schäden an Küstenökosystemen Schäden an Wäldern • Verlust an genetischer Vielfalt • Schäden an Gebirgsökosystemen • Ökosystemleistungen
Boden	
<ul style="list-style-type: none"> • Bodenerosion durch Wasser • Vernässung • Bodenerosion durch Wind • Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/ Biodiversität/ biologische Funktionalität • Rutschungen und Muren 	<ul style="list-style-type: none"> • Bodestoffhaushalt • Wassermangel im Boden • Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktion • Sickerwasser • Produktionsfunktion
Landwirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • Hitzestress bei und Leistungen von Nutztieren • Abiotischer Stress (Pflanzen) • Verschiebung von Anbaugebieten • Agrophänologische Phasen und Wachstumsperioden 	<ul style="list-style-type: none"> • Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen) • Ertragsausfälle • Qualität der Ernteprodukte
Wald- und Forstwirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • Hitze- und Trockenstress • Stress durch Schädlinge/ Krankheiten • Schäden durch Windwurf 	<ul style="list-style-type: none"> • Waldbrandrisiko • Nutzfunktion: Holzertrag • Nutzfunktion: Erholung
Fischerei	
<ul style="list-style-type: none"> • Entkoppelungen der Nahrungsbeziehungen in der Ostsee • Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern • Stress durch Schädlinge/ Krankheiten • Schäden an Aquakulturen
Küsten- und Meeresschutz	
<ul style="list-style-type: none"> • Meerestemperatur und Eisbedeckung • Wasserqualität und Grundwasserversalzung • Meeresspiegelhöhe • Strömungen und Gezeitendynamik • Seegang • Sturmfluten 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen • Beschädigung oder Zerstörung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste • Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • Niedrigwasser • Hochwasser • Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen • Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen) • Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität Chemische Wasserqualität • Grundwasserstand und Grundwasserqualität • Mangel an Bewässerungswasser • Trinkwasser • Produktionswasser

Bauwesen	
<ul style="list-style-type: none"> • Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen • Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser • Vegetation in Siedlungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Stadtklima/ Wärmeinseln • Innenraumklima • Zeiten für Bautätigkeit
Energiewirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • Bedarf an Kühlenergie • Bedarf an Heizenergie¹ • Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger • Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke 	<ul style="list-style-type: none"> • Ertragsminderung oder -zunahme bei Photovoltaikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See • Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung
Verkehrsinfrastruktur	
<ul style="list-style-type: none"> • Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Niedrigwasser) • Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Hochwasser) • Schiffbarkeit der Seeschiffahrtsstraßen • Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser) 	<ul style="list-style-type: none"> • Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (gravitative Massenbewegungen) • Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen • Schäden an Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen
Industrie und Gewerbe	
<ul style="list-style-type: none"> • Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international) • Bedingungen auf Absatzmärkten (international) • Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs • Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland) • Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung Wasserbedarf • Freisetzung gefährlicher Stoffe • Leistungseinbußen von Beschäftigten • Beeinträchtigung von Produktionsprozessen • Aufwand für die betriebliche Planung • Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien¹
Tourismuskirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • Einschränkung touristischer Angebote: Auswirkungen fehlender Schneesicherheit • Einschränkung touristischer Angebote: Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus 	<ul style="list-style-type: none"> • Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen Verlagerung der Nachfrage • Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuskirtschaft
Menschliche Gesundheit	
<ul style="list-style-type: none"> • Hitzebelastung • Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft • Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen • UV-bedingte Gesundheitsschädigung • Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen) • Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen • Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

¹ Bei diesen beiden Klimawirkungen handelt es sich um Chancen des Klimawandels

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Kahlenborn et al. (2021c)

Tabelle 13: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Ertragsausfälle in der Landwirtschaft“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung

Maßnahmen/Instrumente aus APA III	
Maßnahme/Instrument	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
Pflanzen/innovative Pflanzenbausysteme	Züchtung von resilienten und toleranten Sorten und Arten mit hoher Ertragsstabilität; Entwicklung digitaler Entscheidungshilfen für bedarfsgerechte Düngung zur Gewährleistung von Widerstandskraft und optimalem Ertrag;
Pflanzen- und Vorratsschutz	Gezielterer Einsatz von Pflanzenschutzmitteln; Förderung natürlicher Schaderregerregulation; Bereitstellung und Nutzung von Informationen zu einheimischen und gebietsfremden Schadorganismen
Digitalisierung, Agrartechnik	Spezifische Entscheidungshilfen durch Sammlung und Auswertung von Daten zum Aufkommen verschiedener Schadorganismen und Bekämpfungsoptionen unter Einbezug der jetzigen und zukünftigen Witterungsbedingungen
Risikomanagement, Finanzmaßnahmen zur Liquiditätssicherung	Direktzahlungen der 1. Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) als Sicherheitsnetz; Staatliche Ad-hoc-Hilfen sowie steuerrechtliche Regelungen; Bildung von betrieblichen Rücklagen; Versicherungen für Schäden durch Unwetter
Aufbau eines Klimaschadenskatasters	Erfassung von durch den Klimawandel verursachten Schäden und Schadenskosten
Weiterreichende Anpassung	
Aufbau des Versicherungsangebots für Extremwitterschäden	Versicherungszahlungen bei extremwetterbedingten Ertragsschäden; Berücksichtigung von Hochwasserschäden, Schäden im Sonderkulturbereich, Frost- und Trockenschäden an Obst und Gemüse
Aufbau von innerbetrieblichen Risikomanagementstrategien	Diversifizierung durch Direktvermarktung bzw. Weiterverarbeitung von landwirtschaftlichen Produkten, Energieerzeugung, Gastronomie- und Tourismusangebot; Ausbildung von Überkapazitäten, z. B. Anschaffung zusätzlicher Maschinen zur Erntebesleunigung in Schlechtwetterjahren
Steuerliche Anreize zur landwirtschaftsbetrieblichen Risikovorsorge	Ausbau der Gewinnglättungsregelung; Steuerfreie Risikoausgleichsrücklage in ertragreichen Jahren
Investitionen in technische Anlagen	Be- und Entwässerungsanlagen, Verfahren zur Konservierung der Bodenfeuchte, Folienabdeckung, Frostschutzberegnung, Hagelnetze (Maßnahmen abhängig von der Exposition der Betriebe)
Bildung und Beratung bspw. hinsichtlich Beikrautregulierung	Bildungsangebote und Austausch unter Praktikern erhöht die Wahrscheinlichkeit der Übernahme klimaangepasster Techniken und Methoden, bspw. Beikrautbekämpfung durch mechanische Methoden
Anpassung von Pflanzenschutzmitteln	Weiterentwicklung von Applikationsmethoden für Insektizide; Anpassung des Pflanzenschutzmittelspektrums (z. B. aufgrund von Resistenzen, Verlust von Zulassungen der Mittel); Erforschung nützlingschonender Pflanzenschutzmittel
Ausbau des Schaderreger-Monitorings und der Schaderregerprognosen	Adaption witterungsbasierter Schaderreger-Prognosemodelle, z. B. Steigerung der Prognosegenauigkeit durch Ausbau/Instandhaltung des Wetterstationsnetzes
Einsatz von Nützlingen	Unterstützung der Ansiedlung, Vermehrung und Überwinterung von Nützlingen durch entsprechende Landschaftsstrukturen (Hecken und blütenreiche Säume) - Nutzung von Pflanzenextrakten
Ausbau ökologischer Landwirtschaft	Resiliente Anbausysteme; Anbau vielfältiger Kulturpflanzen mit der Möglichkeit zur weiteren Anpassung durch Flexibilisierung von Fruchtfolgeabläufen

Quelle: (Renner et al. 2021)

Tabelle 14: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Nutzfunktion (Holzertrag)“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung

Maßnahmen/Instrumente aus APA III	
Maßnahme/Instrument	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“	Baumartenzusammensetzung, Herkunftswahl, Forschung; Begründung vielfältiger Mischwälder zur Minderung des Produktionsrisikos; Waldpflege (z. B. Durchforstungen) zur Standortoptimierung; Anbau widerstandsfähiger, standortangepasster und schnell wachsender Baumarten
Förderinstrument Waldklimafonds (WKF)	Wissenssammlungen und Methodenentwicklung (z. B. Notfallpläne, Wiederbewaldungsstrategien, längerfristige Holzlagerung, Logistikkonzepte); Begleitforschung zur Anpassung forstbetrieblicher Maßnahmen und Arbeitsverfahren/-abläufe aufgrund klimabedingter Veränderungen; Effizienzsteigerung der nachhaltigen Holzgewinnung in kleinstrukturierten Wäldern; Förderung der Forstpflanzenzüchtung zur Bereitstellung von hochwertigem forstlichen Vermehrungsgut
Weiterentwicklung der Förderung von Maßnahmen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel in der Gemeinschaftsaufgabe für die Agrarstruktur und den Küstenschutz (GAK)	Naturnahe Waldbewirtschaftung (hier u. a. Waldumbau); Forstwirtschaftliche Infrastruktur (hier insbesondere Holzkonservierungsanlagen); Forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse (u. a. Mitgliederinformation, Zusammenfassung des Holzangebots, Professionalisierung von Zusammenschlüssen); Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald (Maßnahmen zur bestands- und bodenschonenden Räumung von Kalamitätsflächen, Waldschutzmaßnahmen, Wiederaufforstung)
Science-Policy-Dialoge zu Klimawandel und Biologischer Vielfalt	Organisation und Durchführung von Konferenzen/Tagungen/Workshops/Seminaren zum Thema Klimawandel und biologische Vielfalt für Personen aus der Wissenschaft, Verwaltung/Behörden, Naturschutzpraxis und Politik, um den gegenseitigen Informationsaustausch zu fördern und Projekte/Strategien/Programme zu entwickeln, die sowohl der Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in Praxis und Politik dienen als auch aktuelle, gesellschaftsrelevante Fragestellungen an die Wissenschaft aufzeigen.
Weiterreichende Anpassung	
Förderung von Beratungsangeboten durch die Forstverwaltung	Förderung von forstwirtschaftlichem Wissen, insbesondere bei Kleinwaldbesitzenden
Förderung forstlicher Zusammenschlüsse zur Unterstützung von Waldbesitzenden (Suda et al. 2013)	Forstliche Zusammenschlüsse können Waldbesitzenden eine Austausch- und Informationsplattform bieten, auch in Hinblick auf Waldbaustrategien und Baumartenzusammensetzungen angesichts der Folgen des Klimawandels
Anpassung der Betriebsabläufe aufgrund klimabedingter Änderungen	Z. B. Anpassung des Zeitpunkts und der Form der Holzernte und verbundene Arbeitsverfahren und -abläufe unter geänderten klimatischen Bedingungen

Quelle: (Renner et al. 2021)

Tabelle 15: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung

Maßnahmen/Instrumente aus APA III	
Maßnahme/Instrument	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
Hochwassergefahrenkarten (speziell Harmonisierung; inklusive Finanzierungsabsicht)	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.
Anpassungsbedarf bzw. klimafeste Ausgestaltung bestehender technischer Normen und Regelwerke im Bauwesen; Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden	Aufbau von Wissensgrundlagen; Identifizierung von Normen und technischen Regelwerken; Etablierung baulicher Standards; Beurteilungshilfen
Bautechnische Lösungen für klimaangepasstes Bauen	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.
Weiterreichende Anpassung	
Überprüfung der Ausweisung von Hochwassergefährdeten Standorten (anpassungssensitive Definition von Gefährdungsgebieten, d.h. Anpassung der rechtlichen Grundlage zur Definition von Gefährdungsgebieten)	Freihaltung von Überflutungsflächen von (weiterer) Siedlungsentwicklung/Bebauung
Neuartige Nutzungskonzepte von Gebäuden/im Gebäudeinneren, bspw. für eine Nutzung kritische Bereiche nur in oberen Geschossen (NBS 2014)	Verlagerung besonders sensibler Gebäudeausstattung
Ausbau von Hochwasserschutzdeichen; Errichtung permanenter oder Verwendung mobiler Hochwasserschutzwände	Reduzierung des Überschwemmungsrisikos
Verknüpfung von Frühwarnsystemen mit Notfallplänen	Umfassendes Risiko- und Schadensmanagement
Verpflichtende Erstellung von Naturgefarengutachten beim Bau	Risikotransparenz, Stärkung des Risikobewusstseins

Quelle: (Voß et al. 2021).

Tabelle 16: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung

Maßnahmen/Instrumente aus APA III	
Maßnahme/Instrument	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
Themenfeld 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" im BMVI-Experten-netzwerk	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")
Operationelle Niedrig-/Mittelwasservorhersagen	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.
Weiterentwicklung der Wasserstandsvoorhersage	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.
Aktionsplan "Niedrigwasser Rhein"	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 Rhein" wurde gemeinsam mit Vertretern großer Industrieunternehmen im Rheineinzugsgebiet und des Binnenschiffahrtsgewerbes entwickelt, um zuverlässig kalkulierbare Transportbedingungen am Rhein sicherzustellen. 1. Wasserstandsvoorhersage 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
Anpassung der Transportkonzepte/Optimierung der Transport- und Ladungsgefäße	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.
Grundlagenermittlung für den systematischen und strukturierten Umgang von Bund und Ländern mit Niedrigwasser und Trockenheit	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.

Weiterreichende Anpassung	
Finanzielle Anpassungsinstrumente: <ul style="list-style-type: none"> - Finanzielle Anreize für Schiffseigentümer und Binnenschiffahrtsunternehmen zur Anschaffung von angepassten Schiffs-konstruktionen - Anpassung der Kredit-vergabe-Richtlinien für Schiffskredite zur erleichterten Finanzierung von kleinen Schiffseinheiten (Rothstein und Scholten 2014) 	Finanzielle Anpassungsinstrumente: <ul style="list-style-type: none"> - Finanzielle Anreize für Schiffseigentümer und Binnenschiffahrtsunternehmen zur Anschaffung von angepassten Schiffs-konstruktionen - Anpassung der Kredit-vergabe-Richtlinien für Schiffskredite zur erleichterten Finanzierung von kleinen Schiffseinheiten (Rothstein und Scholten 2014)
Flussbauliche Maßnahmen: - Angepasste Fahrinnen-unterhaltung; Schaffung von Niedrigwasserkorridoren	Binnenschiffahrts-straßen für Niedrigwasserperioden schiffbar zu halten, unterhaltbar und zukunftstauglich machen
Anpassung der Wasserbewirtschaftung: <ul style="list-style-type: none"> - Verstärkte Regelungen/Einschränkungen von Wassernutzungen im Niedrigwasser-fall - Angepasster Bemessungsansatz für Speicher und andere wasser-wirtschaftliche Anlagen - Überleitungen aus Gewässern mit hohem Dargebot 	Deckung des Wasserbedarfs in Niedrigwasserphasen; Berücksichtigung der Entwicklung von Niedrigwasserkennwerten; Stützung der Schifffahrt in Niedrigwasserphasen

Quelle: (Voß et al. 2021)

Tabelle 17: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Hitzebelastung“ laut APA III sowie Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung

Maßnahmen/Instrumente aus APA III	
Maßnahme/Instrument	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
Zielgruppen-spezifische Information für Fachleute im Gesundheitssektor; Informations-materialien und -tools zur Schulung und Aufklärung für verschiedene Zielgruppen	[...] Durch die Entwicklung von Informations- und Schulungsangeboten (zum Beispiel Multiplikatoren-schulung) über präventive und gesundheitsfördernde Maßnahmen sollen Wissenslücken im Bereich der gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels geschlossen werden. Weiterbildungsmaßnahmen im Sozial-, Gesundheits- und Pflegebereich (unter anderem durch das Öffentliche Gesundheits-weisen) werden durch den Bund unterstützt. [...]
Wirksamkeitsanalysen von gesundheitlichen Anpassungsmaßnahmen im Rahmen von Hitzeaktionsplänen	Bundesweite Erhebung, Wirksamkeitsanalyse und Evaluation von: (i) in der operativen Anwendung/Umsetzung befindlichen Handlungsempfehlungen zur Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit, (ii) geplanten oder bereits angewendeten Hitzeaktions-plänen, (iii) bereits in der operativen Anwendung befindlichen Hitzepräventionsmaßnahmen.
Evaluierung bestehender Maßnahmen durchführen und ggf. verstetigen	Evaluierung der Umsetzung und Wirksamkeit von Handlungsempfehlungen und Präventionsmaßnahmen (zum Beispiel Hitzewarnsystem) mit Formulierung von Empfehlungen für deren Aktualisierung und Weiterentwicklung. [...]
Durchführung/Förderung von Studien zu stadtplanerischen Anpassungsmaßnahmen und Maßnahmengebieten	Analysen zur Überschreitung bestimmter Hitzewarnschwellen und kartographische Aufbereitung, um Hot Spots der Hitzebelastung zu ermitteln (BBSR). Modellierung dieser Belastung für Stadt- und Gebäudeplanung sowie Landschaftsarchitektur mithilfe von GIS-Programmen. Ermittlung von Hot Spots der Hitzebelastung durch Überlagerung räumlich eingegrenzter Gebiete der Hitzebelastung (Andauer, Intensität, Häufigkeit) und sensibler Stadtstrukturen (zum Beispiel Anteil Älterer, Einpersonenhaushalte, geringe Wohnfläche und Ausländeranteil).
Informationsmaterialien und -tools, die auf die vulnerablen Zielgruppen zugeschnitten sind	Zielgruppengerechte Informationsmaterialien über die gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels und mögliche präventive und gesundheitsfördernde Maßnahmen. Im Fokus stehen besonders vulnerable Gruppen (zum Beispiel Kleinkinder, ältere oder vorerkrankte Personen) in Bezug auf Hitze-, UV- und lufthygienische Belastung sowie geeignete Präventivmaßnahmen gegen Gesundheitsschädlinge bei Aufenthalt im Freien.
Anpassung der Informations- und Frühwarnsysteme und Ausweitung der Zielgruppe von Frühwarnsystemen	Anpassung der Informationswege und -zustellungsformen, im Hinblick auf alle Zielgruppen (RKI/UBA, 16). Technische und organisatorische Voraussetzungen sollen geschaffen werden, sodass Warninformationen aus unterschiedlichen behördlichen Quellen harmonisiert und an möglichst viele Menschen verteilt werden können. Entsprechende Warnsysteme bestehen bereits und werden kontinuierlich weiterentwickelt. Etablierung und Weiterentwicklung von Warnsystemen auch für Kranken- und Pflegeeinrichtungen und entsprechende Personengruppen [...]
Weiterreichende Anpassung	
Förderung der Erstellung von Hitzeaktionsplänen, inklusive Festlegung der Zuständigkeiten und einer zentralen Koordinierungsstelle mit Ausbau eines interdisziplinären Netzwerkes.	Weitere Verbreitung und Nutzung von Hitzeaktionsplänen; Klare Zuständigkeitsregelung und Akteursvernetzung mithilfe der Koordinierungsstelle.
Maßnahmen zum Schutz besonders vulnerabler Gruppen; zum Beispiel Ausbau der Maßnahmen zur Reduktion von Hitze in Innenräumen; Ausbau von Akutmaßnahmen.	Besonders vulnerable Personengruppen können durch gezielte Informationskampagnen und zum Beispiel Kontrollmechanismen für die Flüssigkeits- und Medikamentenaufnahme oder Aufenthaltsorte geschützt (kühle Orte) werden.
Bundesweit flächendeckendes, aber regional spezifisches Mortalitäts- und Morbiditäts-monitoring ausbauen.	Möglichkeit der genaueren Einschätzung der regionalen und bundesweiten Morbidität und Mortalität infolge von Hitzebelastung.

Quelle: (Wolf et al. 2021)