

Szenarien der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland im Kontext von Klimaschutz, Klimawandel und Klimaanpassung

Endbericht zum Forschungsauftrag

„Auswirkungen des Klimawandels, des Klimaschutzes und der Klimaanpassung auf
die gesamtwirtschaftliche Entwicklung in Deutschland (FA 05/22)“

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

Dr. Christian Lutz (GWS)

Saskia Reuschel (GWS)

Dr. Britta Stöver (GWS)

Lisa Becker (GWS)

Dr. Andreas Kemmler (Prognos)

Lukas Eiserbeck (Prognos)

Viktoria Leuschner (Prognos)

Jan Limbers (Prognos)

Impressum

AUTOREN (GWS)

Dr. Christian Lutz

Tel: +49 (0) 541 40933-120, E-Mail: lutz@gws-os.com

Saskia Reuschel

Tel: +49 (0) 541 40933-283, E-Mail: reuschel@gws-os.com

Dr. Britta Stöver

Tel: +49 (0) 541 40933-250, E-Mail: stoever@gws-os.com

Lisa Becker

Tel: +49 (0) 541 40933-287, E-Mail: becker@gws-os.com

AUTOREN (PROGNOS)

Dr. Andreas Kemmler

Tel: +41 (0) 61 3273-397, E-Mail: andreas.kemmler@prognos.com

Lukas Eiserbeck

Tel: +49 (0) 211 91316-124, E-Mail: lukas.eiserbeck@prognos.com

Viktoria Leuschner

Tel: +49 (0) 30 587089-178, E-Mail: viktoria.leuschner@prognos.com

Jan Limbers

Tel: +49 (0) 761 7661164-806, E-Mail: jan.limbers@prognos.com

TITEL

Szenarien der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland im Kontext von Klimaschutz, Klimawandel und Klimaanpassung

Endbericht zum Forschungsauftrag „Auswirkungen des Klimawandels, des Klimaschutzes und der Klimaanpassung auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung in Deutschland (FA 05/22)“

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, Januar 2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XII
0 Executive Summary	1
1 Problemstellung, Ziele und Struktur des Forschungsauftrags	6
2 Gesamtwirtschaftliche Ausgaben für Klimaschutz und Klimaanpassung	10
2.1 Bisherige und zukünftige Ausgaben im Klimaschutz	10
2.1.1 Methodischer Ansatz zur Bestimmung der Klimaschutzausgaben	10
2.1.2 Datengrundlagen: Energie- und Klimaschutzszenarien der Roadmap Energieeffizienz 2045	13
2.1.3 Klimaschutzinvestitionen - insgesamt und nach Sektoren	18
2.1.4 Klimaschutzbezogene Gesamtinvestitionen	22
2.1.5 Energieverbrauch und Energieausgaben	23
2.1.6 Abgleich mit der Umweltökonomischen Gesamtrechnung	32
2.2 Bisherige Ausgaben für Klimaanpassung und vereinfachte Abschätzung zukünftiger Ausgaben zur Anpassung an Extremwetterereignisse	35
2.2.1 Herausforderungen in der Ermittlung von Anpassungsinvestitionen	36
2.2.2 Vorgehen zur Ermittlung der Anpassungsinvestitionen	38
2.2.2.1 Vorgehen zur Ermittlung der vergangenen Anpassungsinvestitionen	38
2.2.2.2 Vorgehen zur vereinfachten Abschätzung der zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Referenzszenario	42
2.2.2.3 Vorgehen zur Ermittlung der zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Anpassungsszenario	45
2.2.3 Höhen der Anpassungsinvestitionen	50
2.2.3.1 Höhe der vergangenen und der vereinfacht abgeschätzten zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Referenzszenario	50
2.2.3.2 Vereinfachte Abschätzung der zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Anpassungsszenario	54
2.2.3.3 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse	56

3	Wirkungskanäle und Interaktionen des Klimawandels, der Gegenmaßnahmen sowie Anpassungs- und Transformationsprozesse	60
3.1	Wirkungskanäle und Interaktionen des Klimawandels mit der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung	60
3.1.1	Literaturübersicht	63
3.1.2	Wirkungskanäle	66
3.1.3	Erkenntnisse	78
3.2	Effekte der Anpassungsprozesse auf die Volkswirtschaft	79
3.2.1	Literaturübersicht	79
3.2.2	Zentrale Wirkungskanäle	80
3.2.3	Erkenntnisse	83
3.3	Wirkung der Transformationsprozesse (Klimaschutz) auf die Volkswirtschaft	84
3.3.1	Grundlegende Wirkungskanäle von Klimaschutz	84
3.3.2	Modellberechnungen von Klimaschutzeffekten in der Literatur	90
3.3.3	Erkenntnisse	97
3.4	Zusammenhang der Wirkungskanäle und Interaktionen	98
4	Quantifizierung der Auswirkungen zusätzlicher Extremwetterereignisse und der Gegenmaßnahmen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung, die Wertschöpfungsstrukturen und das Produktionspotenzial	101
4.1	Abbildung im makroökonomischen Modell PANTA RHEI	101
4.1.1	Funktionsweise, Unsicherheiten und Herausforderungen der Szenario-Analyse	101
4.1.2	Vorgehen	102
4.1.3	Das Modell INFORGE/PANTA RHEI	104
4.2	Annahmen und Parameter	106
4.2.1	Übersicht über die Szenarienstruktur	106
4.2.2	Szenarienmodellierung zur Darstellung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen	108
4.2.3	Szenarienmodellierung zur Darstellung der vereinfachten Abschätzung von Anpassung an Extremwetterereignisse	115
4.2.4	Szenariomodellierung zum Klimaschutz	117
4.2.5	Sensitivitätsrechnungen: Verstärkte Extremwetterereignisse (Scen6) und verstärkte Investitionen in Anpassung (Scen7)	121

4.2.6	Sensitivitätsrechnung: Keine Zusätzlichkeit der Klimaschutzinvestitionen (Scen8 KS)	122
4.3	Ergebnisse	123
4.3.1	Die Folgen der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen	123
4.3.2	Die Wirkung der vereinfacht abgeschätzten Ausgaben für Anpassung an Extremwetterereignisse	129
4.3.3	Sensitivitäten Extremwetter und Anpassung	132
4.3.4	Die Wirkung der Klimaschutzmaßnahmen	133
4.3.5	Sensitivität zum Klimaschutz mit Crowding-out	140
4.3.6	Die gemeinsame Wirkung von Klimaschutz, der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzter Anpassung	141
4.4	Wirkung der Szenarien auf das Produktionspotenzial	144
4.4.1	Methodik	144
4.4.2	Ergebnisse im Referenzszenario	145
4.4.3	Modellzusammenhänge in PANTA RHEI	147
4.4.4	Ergebnisse für die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzte Anpassung	149
4.4.5	Ergebnisse für Klimaschutz	151
4.4.6	Ergebnisse für Klimaschutz mit Crowding-out	153
4.4.7	Ergebnisse der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, vereinfacht abgeschätzte Anpassung und Klimaschutz	155
5	Erkenntnisse und Ausblick	157
6	Anhang	167
7	Literaturverzeichnis	170

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Roadmap-Szenario: THG-Emissionen nach Sektoren, 1990 bis 2045, in Mt CO ₂ eq, inkl. der Emissionen bzw. Senkenwirkung des LULUCF-Sektors	17
Abbildung 2:	Szenarienvergleich – Entwicklung der THG-Emissionen im Roadmap-Szenario im Vergleich zur Entwicklung der THG-Emissionen in anderen Energieszenarien, in Mt CO ₂ eq, inkl. der Emissionen bzw. Senkenwirkung des LULUCF-Sektors	18
Abbildung 3:	Jährliche Klimaschutzinvestitionen im Referenzszenario, gemittelt über 5-Jahresperioden, in Mrd. Euro ₂₀₂₀	19
Abbildung 4:	Jährliche Klimaschutzinvestitionen im Zielszenario, gemittelt über 5-Jahresperioden, in Mrd. Euro ₂₀₂₀	20
Abbildung 5:	Differenz der jährlichen Klimaschutzinvestitionen, Zielszenario im Vergleich zum Referenzszenario, gemittelt über 5-Jahresperioden, in Mrd. Euro ₂₀₂₀	21
Abbildung 6:	Klimaschutz- bzw. energiesystembezogene Gesamtinvestitionen im Roadmap-Szenario nach Sektoren sowie die Klimaschutzinvestitionen (Linie), in Mrd. Euro ₂₀₂₀	23
Abbildung 7:	Referenzszenario: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ	24
Abbildung 8:	Roadmap-Szenario (Zielszenario): Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ	25
Abbildung 9:	Differenz im Primärenergieverbrauch nach Energieträgern, Zielszenario im Vergleich zum Referenzszenario, Jahreswerte in PJ	26
Abbildung 10:	Referenzszenario: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ	27
Abbildung 11:	Roadmap-Szenario (Zielszenario): Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ	27
Abbildung 12:	Differenz im Endenergieverbrauch nach Energieträgern, Roadmap-Szenario im Vergleich zum Referenzszenario, Jahreswerte in PJ	28
Abbildung 13:	Energieausgaben für den Endverbrauch nach Energieträgern im Referenzszenario, in Mrd. Euro ₂₀₂₀	31
Abbildung 14:	Differenz der jährlichen Energieausgaben für den Endverbrauch nach Energieträgern; Roadmap-Szenario (Zielszenario) im Vergleich zum Referenzszenario, in Mrd. Euro ₂₀₂₀	31
Abbildung 15:	Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Wirtschaft	32
Abbildung 16:	Investitionen in Maßnahmen für den Klimaschutz, in Mio. Euro	34

Abbildung 17:	Zeitreihe vergangener globaler Investitionen für Klimafolgenanpassung zwischen 2011 und 2020 in Mrd. USD	38
Abbildung 18:	Jährliche geplante Investitionen der Kommunen in Klimaschutz und Klimaanpassung in Mrd. €	41
Abbildung 19:	Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ableitung der Verteilung der Klimaanpassungsaktivitäten auf die Wirtschaftszweige	45
Abbildung 20:	Vereinfachte Abschätzung der jährlichen Investitionen in Anpassung nach Akteuren im Referenzszenario in Mrd. €	51
Abbildung 21:	Vereinfachte Abschätzung der Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse im Referenzszenario nach Branchen von 2012 bis 2050 in Mrd. €	52
Abbildung 22:	Vereinfachte Abschätzung der Investitionen für die Anpassung an Extremwetterereignisse im Referenzszenario nach Branchen und Dekaden in Mrd. €	53
Abbildung 23:	Gegenüberstellung der in beiden Anpassungsszenarien vereinfacht abgeschätzten zusätzlichen Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse nach Branchen von 2024 bis 2050 in Mrd. €	54
Abbildung 24:	Vereinfacht abgeschätzte zusätzliche Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse in den Anpassungsszenarien zwischen 2024 und 2050 in 5-Jahres-Schritten in Mrd. €	55
Abbildung 25:	Verteilung der untersuchten Klimaereignisse in der ausgewählten Literatur	65
Abbildung 26:	Verteilung der ausgewählten Literatur auf Handlungsfelder und Klimawirkungen	66
Abbildung 27:	Zusammenhang zwischen Dekarbonisierung, Außenhandelsbilanzen, Wechselkursen und Inflation	90
Abbildung 28:	Wirkung von Klimaschutzpolitik in Modellen mit unterschiedlichen Modellphilosophien	91
Abbildung 29:	Lösungsraum für plausible Zukünfte, wahrscheinliche Zukünfte und Szenarien als eine mögliche Entwicklung der Zukunft	102
Abbildung 30:	Ablauf einer gesamtwirtschaftlichen Modellanalyse zum Klimaschutz	104
Abbildung 31:	Struktur des umweltökonomischen Modells PANTA RHEI	105
Abbildung 32:	Jahresmittel der Temperatur in Deutschland von 1900 bis 2023	110
Abbildung 33:	Zusammenwirken von Extremwetterereignissen und Anpassung daran in den unterschiedlichen Szenarien- schematische Darstellung	122
Abbildung 34:	Relative Veränderung im BIP und seinen Komponenten durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen für ausgewählte Jahre	124

Abbildung 35:	Durch quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen bedingte kumulierte Verluste im realen BIP (in Mrd. Euro)	125
Abbildung 36:	Wirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen auf unterschiedliche Preise (in %)	126
Abbildung 37:	Durch quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen bedingte Veränderungen bei der Beschäftigung nach Branchen für ausgewählte Jahre (in 1000)	127
Abbildung 38:	Kumulierte Abweichung im realen Bruttoinlandsprodukt 2024-2045 (in Mrd. Euro, auf 10 gerundet)	129
Abbildung 39:	Relative Veränderung im BIP und seinen Komponenten durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen mit vereinfacht abgeschätzter Anpassung für ausgewählte Jahre	131
Abbildung 40:	Veränderungen bei der Beschäftigung durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzte Anpassungsmaßnahmen nach Branchen für ausgewählte Jahre (in 1000)	131
Abbildung 41:	Kumulierte Wirkung durch quantifizierbare Effekte von verstärkten Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzter Anpassung auf die preisbereinigte Wirtschaftsleistung	132
Abbildung 42:	Relative Wirkung auf das preisbereinigte BIP und seine Komponenten durch quantifizierbare Effekte von verstärkten Extremwetterereignissen mit vereinfacht abgeschätzten regulären (Scen6) und verstärkten Anpassungsmaßnahmen (Scen7), in %	133
Abbildung 43:	Relative Abweichung des BIP (preisbereinigt) und seiner Komponenten im Klimaschutzszenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz)	134
Abbildung 44:	Relative Abweichung verschiedener Preise im Klimaschutzszenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz	135
Abbildung 45:	Relative Abweichung der Produktionspreise im produzierenden Gewerbe im Klimaschutzszenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz	136
Abbildung 46:	Relative Abweichung der Produktion (preisbereinigt) im produzierenden Gewerbe im Klimaschutzszenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz	137
Abbildung 47:	Absolute Abweichung der Beschäftigung im Klimaschutzszenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz	138
Abbildung 48:	Relative Abweichung des BIP (preisbereinigt) und seiner Komponenten bei einem vollständigen Crowding-out (Scen8_CO) gegenüber der Referenz	141

Abbildung 49:	Kumulierte Abweichung im realen Bruttoinlandsprodukt 2024-2045 (in Mrd. Euro, auf 10 gerundet)	142
Abbildung 50:	Effekte der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, der vereinfacht abgeschätzten Anpassung und des Klimaschutzes (Scen5) auf das BIP	142
Abbildung 51:	Relative Abweichungen im Bruttoinlandsprodukt und seiner Komponenten durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, Anpassung und Klimaschutz für ausgewählte Jahre	143
Abbildung 52:	Veränderung in der Beschäftigung nach Branchen durch der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, Anpassung und Klimaschutz (in 1000 Personen)	144
Abbildung 53:	Wachstumszerlegung des Produktionspotenzials in der Referenz (Scen1) (in % bzw. bei den Komponenten in Prozentpunkten)	147
Abbildung 54:	Wirkung der der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignisse (Scen2_EW) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)	149
Abbildung 55:	Wirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen des und der vereinfacht abgeschätzten Anpassung daran (Scen3_EWA) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)	150
Abbildung 56:	Wirkung des Klimaschutzes (Scen4_KS) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)	151
Abbildung 57:	Wirkung des Klimaschutzes (Scen4_KS) auf BIP, Stundenproduktivität, Reallohn, Arbeitsstunden und Produktionswert gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)	153
Abbildung 58:	Wirkung des Klimaschutzes mit Crowding-out (Scen8_KS) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)	154
Abbildung 59:	Wirkung des Klimaschutzes mit Crowding-out (Scen8_KS) auf BIP, Arbeitsstunden und Stundenproduktivität gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)	155
Abbildung 60:	Wirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, der vereinfacht abgeschätzten Anpassung und des Klimaschutzes (Scen5_KS) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in %)	156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Szenarien	4
Tabelle 2:	CO ₂ -Preise im nationalen EHS (BEHG) und im EU-ETS, in Euro/t ₂₀₂₀	29
Tabelle 3:	Endverbraucherpreise im Zielszenario, nach Energieträgern, in Euro ₂₀₂₀ /l oder in ct ₂₀₂₀ /kWh	29
Tabelle 4:	Strompreise in den Szenarien nach Sektoren, in ct ₂₀₂₂ /kWh	30
Tabelle 5:	Matrix der nach Wesentlichkeit und Operationalisierbarkeit eingeschätzten Maßnahmen des APA III	43
Tabelle 6:	Zuordnung der Handlungsfelder auf Klimasignale	46
Tabelle 7:	Überblick über die konsolidierten Kosten-Nutzen-Verhältnisse „typischer“ Klimaanpassungsmaßnahmen	49
Tabelle 8:	Cluster und Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie	60
Tabelle 9:	Zentrale Begriffe der Klimawirkungs- und Risikoanalyse	61
Tabelle 10:	Identifizierte Handlungsfelder und Klimawirkungen zur Szenariomodellierung	79
Tabelle 11:	Überblick über zusätzliche ausgelöste („positive“) und gegenläufige/vermiedene („negative“) Effekte der Energiewende (EW)	86
Tabelle 12:	Berechnete Effekte des Klimaschutzes auf die Wirtschaftsleistung im Vergleich zu einer Referenz	95
Tabelle 13:	Berechnete Effekte des Klimaschutzes auf die Wirtschaftsleistung im Vergleich zu einem anderen Klimaschutzszenario	96
Tabelle 14:	Szenarien	106
Tabelle 15:	Anpassungsmaßnahmen nach DAS-Handlungsfeldern und durchschnittlicher Umsetzungszeit	117
Tabelle 16:	Übersicht über die in PANTA RHEI eingestellten Parameter aus der Energiesystemmodellierung	119
Tabelle 17:	Studienergebnisse zu quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen (Verluste im BIP)	128
Tabelle 18:	Folgen der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen mit vereinfacht abgeschätzten zukünftigen Anpassungsmaßnahmen gemessen in kumulierten Abweichungen im BIP und seinen Komponenten in Mrd. Euro (auf 10 gerundet)	130
Tabelle 19:	Korrelation des Wachstumsbeitrages der Totalen Faktorproduktivität nach verwendeter Methode	145

Tabelle 20:	Verwendete Abfragekombinationen in der Literaturrecherche zu Wirkungskanälen des Klimawandels	167
Tabelle 21:	Verwendete Abfragekombinationen in der Literaturrecherche zu Wirkungskanälen der Klimaanpassung	169

Abkürzungsverzeichnis

APA	Aktionsplan Anpassung
BBSR	Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CDD	Cooling Degree Days (Kühlgradtage)
CGE	Computable General Equilibrium
c.p.	Ceteris paribus
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
EFRE	Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung
EFTA	Europäische Freihandelsassoziation (engl. <i>European Free Trade Association</i>)
ESF+	Europäischer Sozialfonds+
EU	Europäische Union
EW	Energiewende
EZB	Europäische Zentralbank
FuE	Forschung und Entwicklung
ggü	gegenüber
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
IAM	Integrated Assessment Model
IEA	International Energy Agency
ILO	International Labour Organization
IMF	International Monetary Fund
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWRA	Klimawirkungs- und Risikoanalyse
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (engl. <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>)
PtX	Power-to-X
TFP	Totale Faktorproduktivität
THG	Treibhausgase

UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations („Vereinte Nationen“)
WZ	Klassifikation der Wirtschaftszweige

0 Executive Summary

Diese Studie untersucht Auswirkungen des Klimaschutzes, quantifizierbarer Effekte von Extremwetterereignissen und der Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung in Deutschland.

Dazu mussten in einem ersten Schritt Datengrundlagen geschaffen werden. Hierzu zählen die Ermittlung der Klimaschutzinvestitionen. Es gibt keine allgemein gültige Definition des Begriffs Klimaschutzinvestition. **Als Klimaschutzinvestitionen werden hier zum einen Investitionen aufgefasst, welche ohne Klimaschutz nicht getätigt würden.** Das sind im Bereich der Industrie beispielsweise Mehrinvestitionen gegenüber konventionellen Technologien (Kostenunterschied zwischen „grüner“ und „brauner“ Technologie). Zum anderen wird im Bereich Energieerzeugung die volle Investitionssumme (etwa des Windrades) angesetzt. **Bereits im Referenzszenario**, das den Politikstand zu Beginn des Jahres 2020 widerspiegelt, **werden bis zum Jahr 2045 Klimaschutzinvestitionen von jährlich 80 bis fast 90 Mrd. Euro getätigt.** Im Klimaschutzszenario werden auf Basis der Energiesystemmodelle von Prognos **anhand des Instrumentenmixes der Roadmap Energieeffizienz 2045** die benötigten Klimaschutzinvestitionen ermittelt. Im Klimaschutzszenario ergeben sich im Zeitraum bis 2035 jährliche Klimaschutzinvestitionen von rund 150 Mrd. Euro, nach 2035 belaufen sich die mittleren, jährlichen Klimaschutzinvestitionen auf 100 bis 120 Mrd. Euro. Im Vergleich zum Referenzszenario **entspricht dies im Klimaschutzszenario zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen in einer Größenordnung von 70 Mrd. Euro jährlich bis 2035 und 20 bis 30 Mrd. Euro jährlich zwischen 2035 und 2045.** Etwa 40 % bis 50 % der gesamten Investitionsgüter (z. B. Gebäude, Fahrzeuge, Kraftwerke, Produktionsanlagen) sind für die Transformation zur Klimaneutralität relevant.

Einerseits sind (Teile der) Klimaschutzinvestitionen definitionsgemäß Kosten. Sie erhöhen somit je nach Verwendungsart die Kosten der Produktion oder des Konsums. Andererseits reduzieren sich durch Klimaschutzinvestitionen die Treibhausgasemissionen. Wo dies mit einer gesteigerten Energieeffizienz einhergeht, verringert sich auch der Energieverbrauch. Zudem sind weitere Kostenvorteile im Betrieb möglich. So sind beispielsweise mögliche Differenzen bei den Unterhaltskosten oder Nutzungsdauerdifferenzen zu berücksichtigen. Um die aus den Effizienzinvestitionen resultierende Kostenersparnis zu ermitteln, werden aus dem Bereich Klimaschutz zusätzlich zu den Klimaschutzinvestitionen die Ausgaben für Energie (laufende Energiekosten) berechnet und als Input bei der volkswirtschaftlichen Modellierung berücksichtigt. Im Referenzszenario werden im Mittel der Jahre 2020 bis 2045 in den Endverbrauchssektoren Gebäude, Verkehr und Industrie jährlich rund 270 Mrd. Euro für den Bezug von Energie ausgegeben. **Im Klimaschutzszenario verringern sich die Ausgaben für Energie in den Jahren 2025 bis 2040 im Vergleich zur Referenz um 15-20 Mrd. Euro jährlich;** nach 2040 nimmt die Differenz ab. Ursache für die geringeren Energieausgaben im Klimaschutzszenario sind **die gesteigerte Energieeffizienz und der dadurch reduzierte Energieverbrauch**, was höhere CO₂-Preise längerfristig mehr als ausgleicht. Hingegen

ist der Strompreis im Klimaschutzszenario höher als im Referenzszenario, was u. a. auf die höheren CO₂-Preise zurückzuführen ist.

Die in der Vergangenheit getätigten Investitionen in die Klimaanpassung liegen lediglich bruchstückhaft in Einzeldaten vor und wurden im Rahmen dieses Projektes erstmals umfassend zusammengetragen. **Die öffentlichen Ausgaben und dadurch induzierte private Ausgaben für die Klimaanpassung dürften nach dem derzeitigen Politikstand aktuell in Deutschland bei 5 bis 6 Mrd. Euro jährlich liegen.** Darüber hinaus treffen Unternehmen und private Haushalte auch Investitionsentscheidungen unter Berücksichtigung von Anpassungsnotwendigkeiten, deren Zuordnung zur Klimaanpassung schwierig ist. **Die realen Kosten der Klimawandelanpassung dürften mit Blick auch auf die nur vereinfacht erfassten quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen erheblich höher liegen.**

Im Rahmen dieser Studie wurden auch auf Basis einer Literaturanalyse genauer die Wirkungskanäle beleuchtet, über die der Klimawandel, die Anpassung an den Klimawandel und der Klimaschutz auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung und die Struktur der Volkswirtschaft wirken. Dabei ist der Forschungsstand aktuell als unterschiedlich gut zu bezeichnen.

Eine vollständige Abschätzung der Auswirkungen von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung ist im Rahmen der vorliegenden Studie wegen des noch offenen und sich schnell ändernden Forschungsstandes nicht möglich gewesen. Dabei bleibt es schwierig zukünftige fundamentale Verschiebungen, die zu starken globalen und lokalen wirtschaftlichen Verwerfungen führen könnten, wie etwa das Überschreiten von Klimakipppunkten, den Kollaps von Ökosystem oder globale Migrationsbewegungen in ökonomische Modelle zu integrieren. **Die vorliegende Studie versucht daher nicht, internationale Klimawandelkosten in diesem umfassenden Sinn zu ermitteln, sondern die potenziellen Auswirkungen bereits bekannter und in der Literatur dokumentierten quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung in Deutschland darzustellen**, um diesbezüglich ein besseres Verständnis zu gewinnen.

In der Literatur zeigt sich in Bezug auf **die Folgen des Klimawandels**, dass dieser in Deutschland direkt vor allem auf die Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei, den Verkehr, die Gebäude und die Infrastruktur generell sowie die menschliche Gesundheit wirkt, **wobei Dürre, Hitze sowie Starkregen und Hochwasser die größte Rolle spielen. Auch im Ausland treten Effekte auf, die die deutsche Volkswirtschaft treffen**, die in der Modellierung aber nur vereinfacht abgebildet werden.

Hinsichtlich der Klimaanpassung wird in der Literatur vor allem der Kosten-Nutzen-Effekt von spezifischen Einzelmaßnahmen untersucht. Eine Bewertung von mehreren Maßnahmen als Maßnahmenpaket auf nationaler Ebene und ihre Einordnung hinsichtlich volkswirtschaftlicher Effekte findet dabei eher selten statt. Dies liegt insbesondere daran, dass Klimawandelfolgen lokal sehr unterschiedlich ausfallen können und daher regional zugeschnittener Anpassungsmaßnahmen bedürfen. Dieser lokale Fokus erschwert auch die Übertragbarkeit spezifischer Modellergebnisse bestimmter regional getätigter Einzelmaßnahmen auf eine deutschlandweit allgemeingültige Ebene, d.h. **es lassen sich nur**

selten bzw. schwer allgemeingültige Effekte von Klimaanpassungsmaßnahmen aus der Literatur ableiten.

Zu den ökonomischen Effekten des Klimaschutzes existiert deutlich mehr Literatur. Dort werden verschiedene Wirkungskanäle von Klimaschutzmaßnahmen aufgeführt und untersucht. Weitgehende Einigkeit besteht darin, dass höhere CO₂-Preise und zusätzliche Investitionen in die Energiewende notwendig sind, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen. **Die gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimaschutzes sind in ihrer Richtung nicht eindeutig und von vielen Faktoren abhängig. Dabei spielt neben der Instrumentierung die Frage eine Rolle, ob höhere Investitionsquoten möglich sind**, so dass die Investitionen in ein dekarbonisiertes Energiesystem zusätzlich getätigt werden können, **oder ob sie andere Investitionen verdrängen** (Crowding-out-Effekt). Ökonomische Modellstudien bevorzugen Preisinstrumente, während Politik oft auch auf Ordnungsrecht oder Fördermaßnahmen setzt. Zunehmend werden in Studien auch Ordnungsrecht und Fördermaßnahmen mitberücksichtigt. Bei Preisinstrumenten gibt es Unterschiede der Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen zwischen Branchen: **Energieintensive Wirtschaftszweige sind abhängiger von Energiepreisen**, sodass sie von höheren CO₂-Preisen und dadurch ausgelösten höheren Investitionen in das Energiesystem stärker betroffen sind. Hersteller der Klimaschutzgüter profitieren eher. **Folglich sind Aspekte des Strukturwandels relevant für die Analyse.** Studien über die Effekte bisher schon realisierter oder geplanter CO₂-Preise in Europa berichten eher positive gesamtwirtschaftliche Effekte (vgl. Metcalf & Stock 2023; Köppl & Schratzenstaller 2023). Offensichtlich sind die dadurch ausgelösten Struktureffekte eher positiv.

Die makroökonomischen Wirkungen der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, der vereinfacht abgeschätzten Anpassung daran und des Klimaschutzes werden in dieser Studie unter Anwendung von Szenario-Techniken auf Basis **des makroökonomischen Modells PANTA RHEI von der GWS ermittelt, wobei Ergebnisse der Energiesystemmodelle von Prognos und weitere Überlegungen als Input Verwendung finden.** Dabei ist dies nach unserem Kenntnisstand die erste Studie, die die Effekte dieser drei Faktoren gemeinsam betrachtet. Der Fokus liegt beim Klimaschutz auf den nationalen Wirkungen von international gleichgerichtetem Handeln.

Das Modell PANTA RHEI ist ein makroökonomisches Modell der deutschen Volkswirtschaft, in dem der langfristige intersektorale Strukturwandel in der wirtschaftlichen Entwicklung auf der Ebene von Wirtschaftszweigen abgebildet wird. Mit dem Modell wurden **fünf Haupt-Szenarien** gerechnet: **ein Referenzszenario** ohne zusätzliche Extremwetterereignisse (EW), Anpassung (A) und Klimaschutz (KS) und **drei Szenarien, die die Folgen von quantifizierbaren Effekten von Extremwetterereignissen, von Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzter Anpassung daran sowie von Klimaschutz zunächst jeweils separat und abschließend in einem weiteren Szenario (EW, A, KS) gemeinsam betrachten.** Außerdem wurden drei Sensitivitäten gerechnet. Politikstand (PS) 2020 unterstellt, dass es gegenüber dem Ende der letzten Legislaturperiode keine neue spezifische Gesetzgebung gegeben hätte und die THG-Minderungsziele damit voraussichtlich verpasst würden.

Für die Erfassung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen werden auf Basis der Literaturstudie die für Deutschland zentralen und wichtigsten Wirkungen

abgeschätzt. Die Kosten durch Extremwetter lassen sich durch Anpassungen an die entsprechenden Folgen reduzieren. Die Modellierung des Klimaschutzes wird insbesondere über zusätzliche Investitionen in entsprechende Maßnahmen abgebildet. Für das Klimaschutzszenario sind auch höhere CO₂-Preise unterstellt.

Tabelle 1: Szenarien

	Szenario	Quantifizierbare Effekte von Extremwetter	Klimaschutz	Anpassung	Vgl. Abschnitt
1	Referenz	Stand 2024	PS 2020	PS 2020	
2	Extremwetterereignisse (EW)	Ja	PS 2020	PS 2020	4.3.1
3	EW und Anpassung	Ja	PS 2020	Ja	4.3.2
4	Klimaschutz (KS)	Stand 2024	Zielerreichung	PS 2020	4.3.4
5	EW, A, KS	Ja	Zielerreichung	Ja	4.3.6
6	Sensitivität EW	Verstärkt	PS 2020	Ja	4.3.3
7	Sensitivität Anpassung	Verstärkt	PS 2020	Verstärkt	4.3.3
8	Sensitivität KS – Crowding-out	Stand 2024	Zielerreichung	PS 2020	4.3.5

Quelle: GWS

Die Ergebnisse zeigen, dass **zusätzliche Extremwetterereignisse eindeutig mindernd auf die Wirtschaftsleistung wirken** und die Schäden mit Voranschreiten des Klimawandels immer größer werden. Bei den hier ermittelten Werten ist zudem zu konstatieren, dass es sich dabei um **konservative Untergrenzen handelt, da nur quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen berücksichtigt werden, die zusätzlich zum heutigen Stand des Klimawandels auftreten**. Negative nicht oder schwer monetarisierbare Effekte wie der Verlust an Lebensqualität, psychische Langzeitwirkungen, Tote, Traumata, der Verlust an Artenvielfalt etc., die sich nicht unmittelbar in monetäre Größen übersetzen lassen, sind bei dieser Abschätzung nicht eingepreist. Auch verschiedene Effekte aus dem Ausland und Wirkungen, die bei Überschreitung von Kipppunkten auftreten könnten, werden nicht betrachtet. Die tatsächlichen gesamten **Folgewirkungen des Klimawandels für die Wirtschaft dürften also deutlich negativer ausfallen und insbesondere nach 2045 noch massiv an Bedeutung gewinnen**. So zeigen Klimamodelle, u.a. für das IPCC (IPCC 2023a), dass die Erderwärmung und mit ihr die Risiken und Wirkungen des Klimawandels insbesondere nach 2045 abhängig von dem Grad der Klimaschutzbemühungen an Intensität und Schwere zunehmen werden. Statistische Analysen, welche die bereits in der Vergangenheit entstandenen Schäden des Klimawandels mitberücksichtigen, zeigen zudem, dass die Klimaschäden, die bis 2050 unabänderlich entstehen werden, bereits über den Investitionskosten in

Klimaschutz liegen dürften (Kotz et al. 2024b) und Klimaschutz im Vergleich zu Klimawandel damit kostengünstiger wäre. **Investitionen in Anpassungsmaßnahmen können einen Teil der Schäden und damit der Kosten durch den Klimawandel verhindern.**

Klimaschutz wirkt im makroökonomischen Modell vor allem über zusätzliche Investitionen in Ausrüstungen und Bauten sowie Konsumausgaben positiv auf die Gesamtwirtschaft. Höhere CO₂-Preise und Strompreise wirken für sich gesamtwirtschaftlich negativ. **Reduzierte Energiekosten** durch höhere Energieeffizienz und den Umstieg auf heimische Energieträger sind wiederum positiv für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung. Aus unserem nachfrageorientierten Modell, das Restriktionen auf dem Kapitalmarkt nicht berücksichtigt, **resultiert ein positiver Effekt der Klimaschutzmaßnahmen auf das BIP, der im Jahr 2030 bei 2,3 % und 2045 bei 0,8 % gegenüber dem Referenzszenario liegt.** Das ist zumindest für 2030 auch verglichen mit ähnlichen Modellen (UBA 2024a) ein hoher Wert und **erklärt sich aus dem recht optimistischen Klimaschutzszenario**, in dem die Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden, ohne dass die Instrumentierung, einzelwirtschaftliche Vorteilhaftigkeit und Finanzierung immer klar sind. Vorzeitige Abschreibungen und Abgänge werden außerdem im Szenario nicht berücksichtigt, weil das Klimaschutzszenario entsprechend gestaltet ist. Die Annahme zur Zusätzlichkeit spielt für die kurz- und mittelfristigen gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimaschutzes eine Rolle. Die gemeinsamen Auswirkungen ergeben sich aus der Addition der Einzeleffekte für die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, die vereinfacht abgeschätzte Anpassung daran und den Klimaschutz.

Mit Hilfe von Filterverfahren wird abgeschätzt, wie sich die Entwicklung des BIP in den unterschiedlichen Szenarien in Veränderungen des Produktionspotenzials übersetzt. Die Entwicklung des Produktionspotenzials kann dann jeweils in seine Komponenten zerlegt werden. **Die Effekte von quantifizierbaren Extremwetterereignissen, Anpassung daran und Klimaschutz auf das Produktionspotenzial sind grundsätzlich vergleichbar mit den Wirkungen auf das BIP. Sie zeigen sich vor allem in der Stundenproduktivität und damit in der Totalen Faktorproduktivität**, aber auch im Arbeits- und Kapitalbeitrag. Extremwetterereignisse wirken negativ, wobei Anpassung die Effekte reduzieren kann. Klimaschutz wirkt zunächst positiv auf das Potenzialwachstum, nach 2030 geht der Effekt wieder zurück. Interessant ist, dass die positiven Wirkungen des Klimaschutzes auf das Potenzial auch dadurch zustande kommen, dass die Arbeitsproduktivität in den Klimaschutzszenarien schneller wächst. Das liegt daran, dass mit höherem BIP, auch ausgelöst durch höhere Energieproduktivität und niedrigere Energieimporte, und bei zugleich höheren Reallöhnen die Stundenproduktivität steigt. **Es kommt auch zu einem Struktureffekt**, weil die zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen vor allem in Branchen mit überdurchschnittlicher Arbeitsproduktivität zu höherem Arbeitseinsatz führen.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass im gewählten Modellrahmen **quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen die gesamtwirtschaftliche Entwicklung negativ beeinflussen, wobei die Wirkung durch Anpassungsmaßnahmen reduziert werden kann. Dagegen wirkt der Klimaschutz unter den Szenario- und Modellannahmen positiv.**

1 Problemstellung, Ziele und Struktur des Forschungsauftrags

Mit den letzten Berichten des IPCC (2023b) wird der Wissensstand zum Klimawandel immer valider und zugleich besorgniserregender. Es besteht große Einigkeit in der Wissenschaft darüber, dass der Klimawandel gegenüber der vorindustriellen Zeit bereits erheblich ist und aufgrund der historisch emittierten Treibhausgase (THG) weiter voranschreiten wird. Zugleich schwinden die Chancen, durch schnelle globale Senkung der THG-Emissionen den globalen Temperaturanstieg auf maximal 1,5°C zu begrenzen, wie im Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 vereinbart wurde. Angesichts neuer globaler Emissionshöchststände im Jahr 2023 und wohl auch 2024 dürfte bereits das Erreichen des 2-Grad-Ziels ambitioniert sein. Zwar haben in den letzten Jahren verschiedene Länder ihr Ambitionsniveau im Klimaschutz erhöht: So strebt die EU ebenso wie die USA und andere Industrieländer Klimaneutralität im Jahr 2050 an. China hat sich zur Klimaneutralität im Jahr 2060 bekannt und selbst Indien hat sich 2070 zum Ziel gesetzt. Allerdings wird der globale Temperaturanstieg bis 2100 selbst in einem optimistischen Szenario, in dem alle angekündigten Ziele eingehalten werden, in einem Bereich von 1,5 und 2,3°C liegen (Climate Action Tracker 2022). Deutschland hat nach dem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts vom Frühjahr 2021 das Ziel der Klimaneutralität auf 2045 vorgezogen. Dies bedeutet in den kommenden 20 Jahren einen weitgehenden Umbau aller Bereiche, die heute noch THG emittieren, neben dem Energiesystem insbesondere auch die energieintensive Industrie, bestimmte emissionsintensive Industrieprozesse, der Verkehr, der Gebäudesektor sowie die Landwirtschaft. Insofern ist ein besseres Verständnis der Effekte des Klimawandels und möglicher Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung dringend geboten.

Es liegen bereits verschiedene Übersichten zu den Wirkungszusammenhängen und Modellanalysen zu den gesamtwirtschaftlichen Effekten des Klimaschutzes vor. Im Vergleich dazu sind die Effekte des Klimawandels und möglicher Anpassungsmaßnahmen in gesamtwirtschaftlicher Hinsicht noch wenig erforscht. Zwar werden Effekte des Klimawandels in Deutschland systematisch erfasst (Kahlenborn et al. 2021b) und es wurden dazu erste sozio-ökonomische Szenarien quantifiziert (Lutz et al. 2019). Die Bundesregierung (2020) hat auch eine Anpassungsstrategie entwickelt, die regelmäßig fortgeschrieben wird. Für die neue Anpassungsstrategie der EU wurde ein Impact Assessment u.a. mit dem makroökonomischen Modell GINFORS-E durchgeführt (EC 2021).

Die High-Level Expert Group on Climate Finance schätzt für das Jahr 2030 einen Bedarf an Klimainvestitionen in den Industrieländern von rund 2,75 Billionen USD₂₀₂₃, wovon für Klimaschutz über 2 Billionen USD₂₀₂₃ anfallen (Bhattacharyya et al., Songwe, V., Soubeyran, E. & Stern, N. 2024). Für Klimaschäden (Loss and Damage) und Anpassung (Adaptation and Resilience) sind es zusammen zwischen 500 und 600 Mrd. USD₂₀₂₃. Für die Schwellen- und Entwicklungsländer ohne China schätzt die Expertengruppe den klimabezogenen Investitionsbedarf für 2030 auf 2,44 Billionen USD₂₀₂₃, wovon 1,6 Billionen auf Klimaschutz und jeweils 250 Mrd. auf Anpassung und Kosten des Klimawandels (Loss and Damage) entfallen. Bis 2035 werden die Investitionsbedarfe für Klimawandel und Anpassung zusammen für diese Ländergruppe mit zunehmendem Klimawandel

bereits auf rund 700 Mrd. USD₂₀₂₃ eingeschätzt, ein drastischer Anstieg, der sich danach noch weiter verstärken dürfte. Die vermiedenen Klimawandelschäden und Ko-Benefits des Klimaschutzes beziffert die Studie global mit jährlich 18 Billionen USD pro Jahr bis 2030. Vermiedene Klimawandelkosten und Ko-Benefits sind der Studie zu Folge somit global bereits bis 2030 fast 3-mal höher als die ermittelten Investitionskosten in Klimaschutz. Nimmt man noch die vermiedenen fossilen Kosten hinzu steigt dieses Verhältnis laut Studie auf Faktor fünf, was die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von globalem Klimaschutz verdeutlicht.

Trotz dieser Erkenntnisse ist zu den Wirkungszusammenhängen im Detail derzeit vieles noch offen. Das hat auch damit zu tun, dass der Klimawandel regional unterschiedlich wirkt, in Ländern mit hohen Temperaturen mehr als in Nordeuropa und in Deutschland an Flüssen oder in trockeneren landwirtschaftlichen Regionen mehr als anderswo, während THG-Emissionen global akkumuliert wirksam sind. Klimaschutzmaßnahmen werden überwiegend national oder sogar EU-weit umgesetzt. Es sind bei Klimaschutz und -wandel ganz unterschiedliche räumliche Ebenen, die betrachtet werden müssen. Dazu kommt die zeitliche Dimension. Klimaschutz wirkt sich unmittelbar ökonomisch aus. Die negativen Effekte des Klimawandels werden vor allem langfristig stark zunehmen. Der Klimawandel ist die langfristige Folge aller THG-Emissionen der Vergangenheit. Die genauen Wirkungszusammenhänge und die Rolle natürlicher Puffer wie der Weltmeere sind nur begrenzt verstanden. Viele Prozesse wie das Abschmelzen der Eisschilde und der damit verbundene Anstieg des Meeresspiegels laufen über sehr lange Zeiträume ab. Bei der Anpassung an den Klimawandel ist die Nutzenwirkung gerade bei Extremwetterereignissen in vielen Fällen sehr unsicher. Ob bspw. ein Starkregenereignis das Ahrtal trifft oder die Mosel, ist zumindest längerfristig nicht vorhersagbar. Sehr wohl ist aber wissenschaftlich belegt, dass Anzahl und Schwere solcher Extremwetterereignisse mit fortgesetztem Klimawandel zunehmen werden. Die Schadenswirkungen werden nicht linear, sondern überproportional über die Zeit zunehmen. Auch ist bei Extremwetterereignissen nicht genau vorhersagbar, welche Klimawirkungen wo eintreten und wo welche Anpassungsmaßnahmen dafür erforderlich sind. Andere gut abschätzbare langfristige Wirkungen wie der Anstieg des Meeresspiegels führen dagegen dazu, dass eine Erhöhung von Deichen für das Hinterland mit hoher Sicherheit ökonomisch lohnend ist.

Quantifizierbare Effekte von zunehmenden Extremwetterereignissen im Inland als Teil der Kosten des Klimawandels

In der wissenschaftlichen Debatte um die Kosten des Klimawandels werden verschiedene Größenordnungen diskutiert, was mit unterschiedlicher räumlicher und inhaltlicher Abgrenzung und unterschiedlichem Studiendesign zu erklären ist. Studien wie die der High Level Expert Group on Climate Finance ((Bhattacharyya, A., Songwe, V., Soubeyran, E. & Stern, N. 2024) zeigen, dass die globalen volkswirtschaftlichen Kosten des Klimawandels mit minus 15-18 Prozent des BIP bereits bis 2030, aber auch die europäischen Kosten des Klimawandels (z.B. Kotz et al. (2024b)) sehr hoch ausfallen könnten und bereits bis 2030 3-5 mal über den globalen Klimaschutzinvestitionen liegen könnten. Bis 2050 und darüber hinaus werden die Kosten des Klimawandels abhängig vom Erfolg des globalen Klimaschutzes voraussichtlich noch weiter steigen, denn selbst global erfolgreicher Klimaschutz und notwendige Anpassungsmaßnahmen werden den Klimawandel erst mit zeitlicher Verzögerung bremsen oder stoppen können. Zugleich

drohen Nichtlinearitäten und Kipppunkte, nach deren Überschreiten sich die negativen Effekte des Klimawandels stark beschleunigen könnten.

Nach vielen Studien (z.B. Kotz et al. (2024b), (Burke et al. 2015)) sind im globalen Süden noch höhere Schäden zu erwarten als im hochindustrialisierten Deutschland in gemäßigten Breiten. Damit ist – ohne Anspruch auf Vollständigkeit - die Gefahr von großflächigen Zerstörungen, Kriegen und Unruhen, Lebensmittelknappheiten, dem Verlust von landwirtschaftlichen Anbauflächen und Siedlungsgebieten und nicht zuletzt von dadurch ausgelöster Massenmigration verbunden. Deutschland als wichtiger Teil der globalen und europäischen Volkswirtschaft wird voraussichtlich deutlich über die reine Wirkung von in Deutschland anfallenden Extremereignissen hinaus als Volkswirtschaft erheblich betroffen sein. So besteht bspw. Unsicherheit bei der Größe von Produktivitätseffekten, über Lieferketteneffekte sowie über globale Migration. Unsicherheiten im Klimasystem wie das Überschreiten von Kipppunkten können die tatsächlichen Klimawandelkosten noch darüber hinaus drastisch steigen lassen.

Wegen der schwierigen Quantifizierung der Kosten des Klimawandels beschränkt sich die im Rahmen dieses Gutachtens vorgenommene Analyse auf die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen im Inland, für die bereits Kosten ermittelt worden sind. Diese Kosten können gut im makroökonomischen Modell PANTA RHEI abgebildet werden. Mit dieser engen Abgrenzung von Klimawandeleffekten liegen auch die ausgewiesenen gesamtwirtschaftlichen Wirkungen der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen in einer Größenordnung vergleichbarer Studien, aber sehr viel niedriger als andere Quantifizierungen, die die Kosten des Klimawandels breit und umfassend abbilden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Referenzszenario ebenfalls bereits Extremwetterereignisse stattfinden. Die hier als „quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen“ ausgewiesenen Kosten sind also diejenigen Kosten von Extremwetterereignissen, die aufgrund der relativ zum Referenzszenario **zusätzlich auftretenden** Extremwetterereignisse entstehen.

Viele der Schäden durch den Klimawandel sind nicht monetarisierbar oder bisher nicht in den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen enthalten. Ein alleiniger Blick auf das Bruttoinlandsprodukt, das konzeptionell die Wirtschaftsaktivität abbilden soll, reicht vor diesem Hintergrund insbesondere für die Bewertung des Klimawandels, der Anpassung und des Klimaschutzes im Sinne einer breiter verstandenen Wohlfahrt und des gesellschaftlichen Fortschritts nicht aus. Wegen der großen Komplexität der damit verbundenen Fragen wurde die Analyse in diesem Gutachten auftragsgemäß für den konkreten Kontext der gesamtwirtschaftlichen Vorausschätzungen gleichwohl auf die Kenngrößen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung, insbesondere das BIP und das Produktionspotenzial, beschränkt. Die Analyse des Klimawandels konzentriert sich auf die nationale Ebene und kann den Großteil der auf Deutschland wirkenden internationalen Klimaschäden nur vereinfacht aufnehmen. Bisher und auch zukünftig nicht monetarisierbare Schäden bleiben in den ausgewiesenen Zahlen unberücksichtigt.

Es ist trotz dieser Einschränkungen sinnvoll, die bisher weitgehend separat betrachteten gesamtwirtschaftlichen Effekte von Klimaschutz und Klimawandel in Form von Extremwetterereignissen sowie Anpassung stärker kombiniert zu analysieren. Die Effekte des Klimaschutzes werden bereits länger diskutiert, sodass zwar keine Einigkeit über die

Wirkungsrichtung besteht, aber doch die wesentlichen Wirkungskanäle identifiziert sind. So sind umfassende Investitionen nötig, die u.a. durch höhere CO₂-Preise, aber auch Ordnungsrecht und Fördermaßnahmen angereizt werden können. Langfristig sinken dadurch die Energiekosten. Die Effizienz- und Substitutionseffekte haben Preis- und Einkommenswirkungen und verändern die Wirtschaftsstruktur. Je nach Ausgestaltung der Transformation sind verschiedene negative Effekte wie die vorzeitige Entwertung von Kapitalgütern und Restriktionen auf dem Arbeitsmarkt möglich.

Außerdem ist durch die langjährige Bilanzierung des Energiesystems sowie der THG-Emissionen klar, welche Sektoren sich umstellen müssen. Beim Klimawandel und der Anpassung ist der Forschungsstand weniger weit. Deshalb liegt im Folgenden ein Schwerpunkt auf einem besseren Verständnis der Wirkungen, die vor allem der national direkt wirksame und monetarisierbare Teil des Klimawandels in Form von Extremwetterereignissen aber auch die Anpassung daran auf die Gesamtwirtschaft haben. Für die Analyse gelten die in der Box oben genannten Limitationen.

Vor diesem Hintergrund wurde das Projekt „Auswirkungen des Klimawandels, des Klimaschutzes und der Klimaanpassung auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung in Deutschland“ initiiert. Im Rahmen der Arbeitspakete 1 und 2 werden in diesem Bericht zum einen die statistischen Grundlagen zu den Ausgaben für Klimaschutz und Klimawandelanpassung dargelegt (Abschnitt 2). Neben der Methodik und den damit verbundenen Herausforderungen werden die bereits getätigten Ausgaben beschrieben sowie die absehbaren zukünftigen Bedarfe bestimmt. Anschließend werden die möglichen Wirkungskanäle des Klimawandels, der Klimaschutz- und der Klimaanpassungsmaßnahmen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung auf der Basis einer Literaturrecherche dargestellt und diskutiert (Abschnitt 3). Dabei wird ein Literaturüberblick über die Wirkungsmechanismen auf die Wirtschaft und die Höhe ihrer Effekte gegeben. Mit dem Modell PANTA RHEI werden in Abschnitt 4 die Wirkungen des Klimawandels in Form von Extremwetterereignissen, der Anpassung und des Klimaschutzes auf BIP, Wirtschaftsstruktur und Produktionspotenzial zunächst einzeln und dann kombiniert betrachtet. Dazu werden verschiedenen Szenarien entwickelt, die für den Klimaschutz auf Bottom-up-Modellen des Energiesystems der Prognos beruhen. Die Effekte der Extremwetterereignisse werden direkt in PANTA RHEI quantifiziert. Für die Anpassungsinvestitionen wird auf Berechnungen der Prognos zurückgegriffen. Diese stützen sich auf einen Bottom-up-Ansatz sowie eine Abschätzung mittels Kosten-Nutzen-Verhältnissen unter der Einbeziehung verschiedenster Quellen. Außerdem werden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Zudem werden für die Szenarien auch die Auswirkungen auf das Produktionspotenzial abgeschätzt, das mithilfe von einfachen Glättungsverfahren bestimmt wird. Es ist zu betonen, dass es sich um Szenarien handelt, die Effekte von Klimaschutz, Extremwetterereignissen und Anpassung daran quantifizieren. Es sind keine Prognosen wahrscheinlicher zukünftiger Entwicklungen. Abschließend werden in Abschnitt 5 die wesentlichen Erkenntnisse gesammelt und ein kurzer Ausblick gegeben.

2 Gesamtwirtschaftliche Ausgaben für Klimaschutz und Klimaanpassung

2.1 Bisherige und zukünftige Ausgaben im Klimaschutz

2.1.1 Methodischer Ansatz zur Bestimmung der Klimaschutzausgaben

Als Klimaschutz wird gemeinhin die Gesamtheit aller Maßnahmen zur Vermeidung oder Minderung von THG-Emissionen verstanden, mit dem Ziel, die langfristigen Auswirkungen des Klimawandels einzudämmen (NCCS 2021). In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Effekte des Klimaschutzes im Rahmen dieses Vorhabens in die volkswirtschaftliche Modellierung eingehen, wie diese bestimmt werden und wie sich diese Effekte im Zeitverlauf entwickeln. Die Übergabe an das volkswirtschaftlichen Modell PANTA RHEI aus dem Bereich Klimaschutz beinhaltet Angaben zu folgenden Bereichen:

- Investitionen in Klimaschutz (nach Sektoren und Technologiebereichen; Kapitel 2.1.3 und 2.1.4),
- Vorgaben zur Entwicklung der sektoralen Strompreise (Kapitel 2.1.5),
- CO₂-Preise (Kapitel 2.1.5) sowie
- die Kosten des Energieverbrauchs bzw. Energiebezugs (Kapitel 2.1.5).

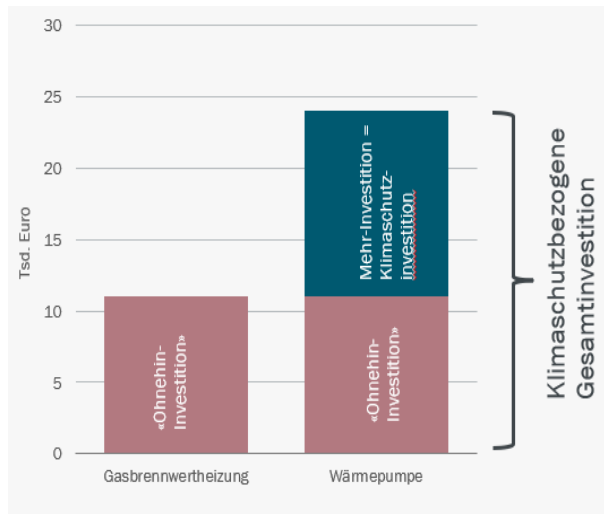
Ersteres erfasst Investitionen in Sachgüter zur Nutzung erneuerbarer Energien, Stromanwendungen (z. B. Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge), aber auch Effizienzmaßnahmen ohne Energieträgerwechsel. Die Kosten des Energieverbrauchs werden aus der konsumierten Energiemenge und dem Energiepreis berechnet. Dabei wird nach Energieträgern mit unterschiedlichen Bezugspreisen unterschieden, beispielsweise Strom, Fernwärme, Erdgas, Diesel oder Heizöl. Diese Kosten des Energieverbrauchs hängen stark von den eingesetzten Technologien ab. Klimaschutzinvestitionen verringern die Ausgaben für fossile Energieträger.

Definitionen der verwendeten Investitions- und Kostenbegriffe

Es gibt keine allgemein gültige Definition des Begriffs Klimaschutzinvestition. Es bestehen unterschiedliche Begriffskonzepte, die sich insbesondere in der Perspektive und dem Erfassungszweck unterscheiden (IW 2022).

Als **Klimaschutzinvestitionen** werden hier diejenigen Investitionen aufgefasst, welche ohne Klimaschutz nicht getätigt würden. Die Klimaschutzinvestitionen beinhalten demnach die Mehr-Investitionen (oder Minder-Investitionen) gegenüber den konventionellen (fossilen) Referenztechnologien sowie Investitionen in Güter, die ohne Klimaschutz nicht nachgefragt würden. Wo eine Klimaschutzinvestition eine Investition in eine fossile Technologie ersetzt, wird die verdrängte Investition gegengerechnet: In diesen Fällen beinhaltet eine Klimaschutzinvestition nicht die Gesamtinvestition, sondern lediglich die Mehrinvestition gegenüber der verdrängten fossilen Referenztechnologie. Das gilt allerdings nicht für die Stromerzeugung (siehe weiter unten).

Beispielsweise wird bei einer Wärmepumpe lediglich der Differenzbetrag gegenüber der Anschaffung einer Gasbrennwertheizung als Klimaschutzinvestitionen berücksichtigt (siehe Schaubild rechts). Analog dazu wird bei einem Elektro-Pkw lediglich die Differenz gegenüber dem Anschaffungspreis eines vergleichbaren Pkw mit konventionellem Antrieb berücksichtigt. Dies gilt, da auch ohne Klimaschutz in eine Heizung oder in einen Pkw investiert worden wäre.¹ Bei Technologien, die ohne Klimaschutz mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zum Einsatz kommen würden, wie beispielsweise die Erzeugung von grünem Wasserstoff oder die Abscheidung von Kohlenstoff (CCS-Technologie), wird keine fossile Referenztechnologie angenommen. In diesen Fällen wird der Klimaschutzinvestition die gesamte Investition angerechnet.



Quelle: eigene Darstellung Prognos

Im Gegensatz zu den Klimaschutzinvestitionen beinhalten **klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen** das gesamte Investitionsvolumen in den Energie- und Klimaschutz-relevanten Bereichen. Sie beinhalten alle Investitionen innerhalb des Energiesystems, auch Investitionen in konventionelle Technologien. Die energiesystem- und klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen geben Auskunft über das Volumen, das insgesamt im Laufe der Transformation umgeschlagen werden muss, inklusive derjenigen Investitionen, die ohnehin getätigt werden. Entsprechend beinhalten sie zusätzlich zu den Klimaschutzinvestitionen auch die Ohnehin-Investitionen in die konventionellen Referenztechnologien. Die energiesystem- und klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen beinhalten beispielsweise die Gesamtinvestitionen für Wärmepumpen, aber auch Investitionen

¹ Eine Ausnahme bildet der Sektor Energiewirtschaft, für diesen Sektor wurde ein unterschiedliches Vorgehen gewählt. Im Sektor Energiewirtschaft wird keine Referenztechnologie unterschieden und die Klimaschutzinvestitionen werden als Vereinfachung mit den Gesamtinvestitionen gleichgesetzt. Dies ist darin begründet, dass z. B. Kohlekraftwerke deutlich abweichende Betriebsweisen und Benutzungsstunden aufweisen als Anlagen auf Basis von Wind oder Photovoltaik und dadurch die installierten Kraftwerksleistungen nicht direkt verglichen werden können. Außerdem führen die Klimaschutzmaßnahmen in den Endverbrauchssektoren zu einer starken Elektrifizierung und damit zu einem höheren Strombedarf. Um die Stromnachfrage und den Investitionsbedarf in einer Welt ohne Klimaschutz exakt bestimmen zu können, müsste ein kontrafaktisches Energieszenario berechnet werden, was im Rahmen dieses Vorhabens nicht leistbar war. Mit dem hier gewählten vereinfachten Vorgehen werden die Klimaschutzinvestitionen im Sektor Energiewirtschaft etwas überschätzt, da die Ohnehin-Investitionen (für fossile Kraftwerke) nicht in Abzug gebracht werden. Ein alternativer Ansatz wäre, die heute beobachteten Investitionen als Baseline zu verwenden und als Ohnehin-Investitionen zu betrachten. Diese Investitionen lagen in den Jahren um das Jahr 2020 bei rund 20-25 Mrd. Euro/Jahr (inkl. der Stromnetze). Da in der nachfolgenden volkswirtschaftlichen Analyse die Differenz zwischen zwei Pfaden betrachtet wird, spielt es jedoch keine Rolle, ob dieser Sockel berücksichtigt wird, da der Sockel in beiden Szenarien identisch ist.

in Gasbrennwertheizungen, soweit solche im Szenario noch getätigt werden. Es werden auch im Zeitverlauf abnehmende Investitionen in fossile Energie-Infrastrukturen miteingefasst, wie beispielweise Investitionen in Gasnetze und Raffinerien.² Diese Abgrenzung der Investitionen ermöglicht Aussagen zur Entwicklung des Gesamt-Investitionsbedarfs. Die Abgrenzung berücksichtigt, dass steigende Investitionen in Klimaschutz zumindest teilweise durch im Zeitverlauf abnehmende Investitionen in konventionelle (fossile) Güter und Infrastrukturen kompensiert werden.

Für die Berechnung der Effekte des (zusätzlichen) Klimaschutzes auf die Volkswirtschaft mit dem Modell PANTA RHEI wird die Differenz der Ausgaben zwischen zwei Entwicklungspfaden berücksichtigt. Als Input werden die **Differenzinvestitionen** zwischen einem Referenz- und einem Zielpfad („Investitionsimpuls“) sowie die Differenz der Energieausgaben verwendet.

In der vorliegenden Arbeit wird ein enger Investitionsbegriff verwendet, welcher im Wesentlichen materielle Sachanlagen in Technologien zur direkten oder auch indirekten Reduktion von THG-Emissionen umfasst. Berücksichtigt werden unter anderem Investitionen in erneuerbare Energien zur Strom- und Wärmeerzeugung, in energieeffiziente Gebäude, Geräte, Anlagen und Fahrzeuge, Investitionen in die Energieinfrastrukturen wie Strom- und Wärmenetze, die Ladeinfrastruktur sowie Investitionen in Technologien für technische CO₂-Senken. Dabei werden die Investitionen von öffentlichen und von privaten Akteuren sowie sowohl Ersatz- als auch Erweiterungsinvestitionen erfasst.

Die hier verwendete Definition von Klimaschutzinvestition beinhaltet keine Ausgaben für Forschung und Bildung und auch keine Investitionen in Naturkapital. D.h. Land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen zur Bildung von natürlichen CO₂-Senken, die ebenfalls zur Erreichung der Emissionsziele beitragen, werden als Vereinfachung nicht berücksichtigt.³

Besondere Herausforderungen beim gewählten Konzept der Klimaschutzinvestition sind insbesondere die Wahl der Referenztechnologie und die Datengrundlagen. Die Wahl der fossilen Referenztechnologie ist nicht in jedem Fall eindeutig und die Referenztechnologie kann sich im Prinzip im Zeitverlauf ändern. Beispielweise wurden Gasheizungen bis vor kurzer Zeit als effiziente Heizungstechnologie gefördert, heute sollen die mit fossiler Energie betriebenen Anlagen ersetzt werden. Die Gasheizungen könnten zukünftig aber auch mit grünen Gasen genutzt werden, in dem Fall wären sie kompatibel mit den Klimaschutzzielen.

² Damit wird erfasst, dass bei ambitionierterem Klimaschutz ein Teil des heute bestehenden Investitionsbedarfs in die Instandhaltung der bestehenden Infrastruktur wegfällt.

³ In den genutzten Energieszenarien zur Roadmap-Energieeffizienz wurden keine Annahmen zu land- und forstwirtschaftlichen Maßnahmen getroffen. Basierend auf Angaben des Öko-Instituts liegen die Investitionen in land- und forstwirtschaftlichen Maßnahmen zum Schutze des Klimas aktuell bei wenigen Millionen Euro pro Jahr. In ambitionierten Klimaschutzszenarien, in denen dieser Bereich als relevante natürliche Senke genutzt werden soll, steigen die jährlichen Klimaschutzinvestitionen auf bis etwa 0,5-1 Mrd. Euro₂₀₂₀/Jahr (u.a. für Wiedervernässung von Mooren, Aufforstung und Anlage von Agro-Forest).

2.1.2 Datengrundlagen: Energie- und Klimaschutzszenarien der Roadmap Energieeffizienz 2045

Die Berechnung der Klimaschutzinvestitionen und auch der klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen erfolgt mit einem Bottom-up-Ansatz durch eine monetäre Bewertung der in Verkehr gesetzten Klimaschutzgüter. In den Jahren bis 2020 basiert die genutzte Mengenentwicklung der neu in Verkehr gesetzten Klimaschutzgüter soweit vorhanden auf statistischen Angaben z. B. bezüglich der zugebauten Wärmepumpen, installierten Leistungen an PV- und Windanlagen. Die Mengenentwicklung der jährlich neu in Verkehr gesetzten Klimaschutzgüter ab dem Jahr 2020 wird aus Energieszenarien abgeleitet. Die spezifischen Kosten der Güter, welche für die Monetarisierung der physischen Mengen genutzt werden, basieren soweit möglich auf Literatur. Wo dies nicht möglich ist, werden eigene Kostenschätzungen vorgenommen.

Berechnet werden die Klimaschutzinvestitionen, Energieausgaben und Strompreispfade für zwei Energieszenarien, welche zwei Transformationspfade mit unterschiedlicher THG-Emissionsreduktionen abbilden. Im Rahmen des Vorhabens werden keine eigenständigen Energieszenarien entwickelt. Die benötigten Informationen zu den beiden Transformationspfaden werden aus bestehenden Szenarien abgeleitet. Verwendet werden zwei Szenarien, die im Rahmen des Vorhabens Roadmap Energieeffizienz 2045 (Prognos 2023) für das BMWK erstellt wurden. Die Szenarien der Roadmap Energieeffizienz wurden ausgewählt, da der dort erstellte Szenarienfächer sowohl einen Referenzpfad mit moderater THG-Emissionsreduktion als auch einen Zielpfad mit vollständiger Reduktion der THG-Emissionen (netto-null) aufweist. Außerdem hat Prognos als Ersteller der Roadmap-Szenarien einen vollständigen Zugriff auf die im Rahmen der Berechnungen erzeugten Daten. Damit lassen sich die notwendigen Informationen zu den Investitionen und die Energieausgaben belastbar herleiten. Darüber hinaus konnten pfad-spezifische Strompreise nach Verbrauchergruppen berechnet werden, welche ebenfalls als Input für die Modellierung der volkswirtschaftlichen Effekte genutzt werden.⁴ Die beiden Transformationspfade sind bis zum Jahr 2020 identisch und beginnen sich danach zu trennen. Im Nachfolgenden werden die zentralen Annahmen der beiden verwendeten Szenarien kurz beschrieben.

Referenzszenario: Das Referenzszenario basiert im Ex-Post-Zeitraum 1990–2020 auf den Ist-Werten. Es stützt sich grundsätzlich auf die beobachteten und in Statistiken dokumentierten Größen des Energieverbrauchs, der Preise, der Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung sowie auf die jeweilige Jahreswitterung. Die Entwicklung der Jahre 2021 bis 2045 wird als „weiter wie bisher“ interpretiert. Berücksichtigt werden die bis Januar 2020 beschlossenen politischen Maßnahmen, inkl. des Klimaschutzprogramms (KSP) 2030 und des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG). Im Referenzszenario werden diese Instrumente in der bestehenden Form weitergeführt, aber nicht über

⁴ Der Fokus des Vorhabens Roadmap Energieeffizienz lag auf den Endverbrauchssektoren Industrie, Gebäude (Haushalte, GHD) und Verkehr. Der Sektor Energiewirtschaft wurde nur für das Hauptszenario (Roadmap-Szenario) berechnet. Für die Berechnung der Investitionen für den Referenzpfad musste aus diesem Grund auf das Szenario KSG des NECP-I zurückgegriffen werden, welches bis zum Jahr 2030 ebenfalls auf dem Regulierungsstand Januar 2020 beruht (Prognos 2021). Für die Berechnung der Strompreise wurde der Szenariolauf mit aktuelleren Brennstoffpreisen wiederholt (Stand Herbst 2023).

den im Jahr 2020 definierten Rahmen hinaus ausgeweitet oder verschärft. Im Jahr 2020 beobachtete Technikrends werden fortgeschrieben. Dies beinhaltet eine moderate autonome Technikentwicklung. Auch die Trends bei der Verschiebung der Energieträgerstruktur, z. B. bei der Raumwärme, werden fortgeschrieben, unter Berücksichtigung der Entwicklung der Anlagenkosten und Energiepreise. Im Referenzszenario werden keine bindenden Energie- und Klimaziele vorgegeben, die Verfehlung der Klimaschutzziele und Energieeffizienzziele wird im Szenario in Kauf genommen. Mit diesem Pfad werden die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 1990 um rund 50 % und bis zum Jahr 2045 um 75-80 % vermindert.

Zielszenario – das Roadmap-Szenario: Das Roadmap-Szenario ist das Hauptszenario der im Rahmen der Roadmap Energieeffizienz 2045 berechneten Energieszenarien. Es ist ein ambitioniertes Zielszenario, in dem die Ziele des Klimaschutzgesetzes erreicht werden und bei dem die Energieeffizienz und die Elektrifizierung einen sehr hohen Stellenwert einnehmen. Die zentralen Ziele bilden die sektoralen THG-Reduktionsziele für das Jahr 2030 (insgesamt -65 % ggü. 1990) und das Erreichen der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045. Im Jahr 2045 noch verbleibende Restemissionen werden durch negative Emissionen ausgeglichen (netto-null). Für die Erreichung der Reduktionsziele im Jahr 2030 werden im Roadmap-Szenario zusätzliche politische Maßnahmen unterstellt. Den Kern der zusätzlichen Maßnahmen bilden die Vorschläge und Abschätzungen zum Klimaschutzsofortprogramm 2022 (Fraunhofer ISI et al. 2022). Im Zeitraum nach 2030 werden außerdem zusätzliche technische Maßnahmen angenommen, um die Klimaneutralität bis 2045 sicherzustellen. Die THG-Vermeidung ist dadurch nicht mehr ausschließlich durch die Klimaschutzinstrumente getrieben.

Im Roadmap-Szenario wird das gesamte Energiesystem inkl. der Strom- und Fernwärmeerzeugung modelliert. Dadurch kann sowohl der Endenergieverbrauch als auch der Primärenergieverbrauch berechnet und das Erreichen der Klimaneutralität abgeschätzt werden. Das Roadmap-Szenario basiert nicht auf einer (volkswirtschaftlichen) Kostenoptimierung. Aufgrund der starken Gewichtung der Effizienzmaßnahmen ist zu erwarten, dass die Investitionen höher ausfallen als bei alternativen Zielszenarien, die beispielsweise stark auf synthetische Energieträger setzen (u. a. Wasserstoff, synthetische Treibstoffe).⁵ Aufgrund der stark gesteigerten Energieeffizienz werden im Roadmap-Szenario jedoch der Energieverbrauch und die damit verbunden Ausgaben für den Energiebezug verringert. Diese Einsparungen fallen auch nach dem Jahr 2045 weiter an, werden in dieser Arbeit jedoch nicht vollumfänglich berücksichtigt.

⁵ Beim Einsatz synthetischer Energieträger können verbreitet bestehende Technologien weitergenutzt werden (z. B. H₂-Ready-Gaskessel, Verbrenner-Pkw), wodurch sich ein geringerer Investitionsbedarf ergibt als bei der Elektrifizierung (Umrüstung von Anlagen). Allerdings bleibt der Energieverbrauch bei synthetischen Energieträgern hoch, da die fossilen Technologien in der Regel weniger energieeffizient sind als entsprechende Stromanwendungen. Wird die Erzeugung der synthetischen Energieträger mit eingerechnet, ergibt sich ein deutlich höherer Gesamtenergieverbrauch. Zudem ist die Nutzung der synthetischen Energieträger mit hohen Energiekosten und hohen Energieimporten verbunden. Deshalb werden Klimaschutzszenarien mit einem Fokus auf Strom in der Regel als vorteilhafter angesehen (vgl. dazu auch die Arbeiten zu den Langfristszenarien des BMWK <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>).

Die für die Berechnung der Energieszenarien eingesetzten Bottom-up-Modelle bilden die physischen Güter in Kohortenmodellen ab. Dabei wird das Alter und die Lebensdauer der Güter berücksichtigt. Ersatzinvestitionen werden in den Energieszenarien in der Regel erst nach Ablauf der Lebensdauer der Güter getätigt (**keine vorzeitigen Stilllegungen**). Beispielweise werden energetische Sanierungen von Gebäuden im Rahmen ohnehin stattfindender Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt und die Umstellung von Industrieprozessen erfolgt im Rahmen von üblichen Ersatzzyklen.⁶

Das Roadmap-Szenario setzt auf identischen Annahmen bezüglich der **Rahmendaten** auf wie das Referenzszenario.

- Die Bevölkerung entwickelt sich in den Szenarien nach den Berechnungen der 14. Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes (Variante 2: G2-L2-W2; StBA 2019). Unter den dort festgelegten Annahmen wird die Bevölkerung in Deutschland zunächst bis zum Jahr 2035 geringfügig abnehmen. Nach 2035 verstärkt sich der Rückgang. Die Zahl der Bevölkerung verringert sich von 83,5 Millionen im Jahr 2019 über 83,1 Millionen im Jahr 2030 auf 81,1 Millionen im Jahr 2045 (-2,8 %).
- Trotz der rückläufigen Bevölkerung nimmt die Zahl der privaten Haushalte zunächst weiter zu. Grund für den Anstieg ist die weiter sinkende durchschnittliche Haushaltsgröße.
- Die Zahl der Erwerbstätigen geht in den Szenarien mittel- und längerfristig zurück und liegt 2045 bei noch 39,1 Millionen (2030: 42,1 Mio.). Ursächlich für den Rückgang ist unter anderem die demografische Entwicklung: Die Bevölkerung nimmt ab und wird älter (Anteil der Personen im Erwerbsalter nimmt ab).
- Trotz abnehmender Zahl an Erwerbstätigen steigt in den Szenarien die reale Wirtschaftsleistung, gemessen am Bruttoinlandsprodukt (BIP), zwischen 2019 und 2030 mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von 1,0 % an. Im Zeitraum 2030 bis 2045 wächst das BIP mit einer durchschnittlichen Rate von 1,1 % p. a. Insgesamt erhöht sich das BIP von 3.448 Mrd. Euro im Jahr 2019 über 3.832 Mrd. im Jahr 2030 auf 4.501 Mrd. im Jahr 2045. Die unterstellte Entwicklung des BIP basiert auf dem Prognos Economic Outlook (Prognos 2021).

Einordnung der Differenzen bei den sozio-ökonomischen Rahmendaten

Die oben beschriebenen sozio-ökonomischen Rahmendaten (Bevölkerung, BIP) in den Szenarien der Roadmap Energieeffizienz unterscheiden sich von den Entwicklungen, die im Rahmen dieses Vorhabens für die Bestimmung der volkswirtschaftlichen Effekte angenommen werden (Kapitel 4). Die Festlegung der Rahmendaten für die Szenarien der Roadmap Energieeffizienz erfolgte bereits im Jahr 2020. Für die Bestimmung der volkswirtschaftlichen Effekte in Kapitel 4 werden aktuellere Annahmen verwendet. Bei der Bevölkerung liegen die Unterschiede rund 2–3 %. Bei der BIP-Entwicklung sind die

⁶ Ausnahme bilden Teile der Gasinfrastruktur und Kohlekraftwerke, wobei bei Letzteren der Einsatz auch durch die steigenden CO₂-Preise beeinflusst wird. Die Verkürzung der Lebensdauer von Gaskesseln wird im Energiemodell und den daraus abgeleiteten Investitionen durch einen verstärkten Zubau von Wärmenetzen und Wärmepumpen abgebildet.

Unterschiede aufgrund des Ukrainekriegs und der schwächeren Welthandelsentwicklung sowie der verschlechterten internationalen Wettbewerbsfähigkeit größer. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsraten liegen zwischen 2019 und 2030 nur bei 0,6% und danach bei 0,5%. Bei der Erwerbstätigkeit gibt es ebenfalls größere Unterschiede, weil die Zahlen bis heute trotz schwachem Wirtschaftswachstum deutlich stärker zugenommen haben, als dies 2021 allgemein erwartet wurde. Der dahinter liegende Trend einer schwachen Entwicklung der Arbeitsproduktivität wird in Kapitel 4 fortgeschrieben.

Da die Differenz bei der Bevölkerungsentwicklung klein ist (2–3 %), wird die Auswirkung des Unterschieds auf die berechneten Investitionen für Klimaschutz als gering eingeschätzt. Viele wichtige Mengentreiber der THG-Emissionen, wie beispielsweise der Pkw-Bestand, die Pkw-Verkehrsleistung oder der Wohnflächenbedarf, verhalten sich annähernd proportional zur Bevölkerung. Daraus wird vereinfachend geschlossen, dass sich durch eine Veränderung der Bevölkerung um 2–3 % auch die THG-Emissionen und die Investitionen zu deren Vermeidung um 2–3 % verändern würden.⁷

In die nachfolgende Berechnung der volkswirtschaftlichen Effekte durch Klimaschutz fließen lediglich die Differenzen bei den Investitionen und den Kosten des Energieverbrauchs zwischen dem Referenz- und dem Zielszenario ein. Die leicht veränderte Bevölkerung würde sowohl im Referenzszenario als auch im Zielszenario den Investitionsbedarf und die Ausgaben für den Energiebezug leicht erhöhen. Die absolute Differenz zwischen den beiden Energieszenarien würde sich durch den Niveauunterschied bei der Bevölkerung nur geringfügig verändern. Daraus wird gefolgert, dass die Auswirkungen der leicht unterschiedlichen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung die berechneten volkswirtschaftlichen Effekte durch Klimaschutz nicht wesentlich beeinflussen.

Beim BIP sind die Unterschiede zwischen den Szenarien der Roadmap Energieeffizienz und der volkswirtschaftlichen Analyse (Kapitel 4) größer. Doch auch hier gilt, dass lediglich die Differenz der Investitionen und der Energieausgaben zwischen dem Referenz- und dem Zielszenario in die volkswirtschaftliche Analyse einfließt und sich diese Differenz zwischen den Energieszenarien aufgrund des Niveauunterschieds bei der Wirtschaftsentwicklung nur wenig verändern dürfte, zumal die Wirtschaftsentwicklung in den CO₂-intensiven Wirtschaftsbereichen jeweils weitgehend stagniert.

Eine Iteration der beiden Analyseteile wird nicht durchgeführt. Die in Kapitel 4 abgeschätzten Auswirkungen auf die Wirtschaftsentwicklung wird nicht in die Energiemodelle eingespeist, um modifizierte Energieszenarien mit angepassten Investitionen und Ausgaben für den Energiebezug zu berechnen. Auch dieser Effekt wird als gering eingeschätzt, da die in Kapitel 4 berechneten Auswirkungen durch Klimaschutz auf das BIP im Bereich von lediglich 1-2 % liegen.

Mit der im Roadmap-Szenario unterstellten Umsetzung einer sehr dezidierten Instrumentierung zur Stärkung der Energieeffizienz in allen Sektoren verringern sich die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 auf noch 390 Mio. t CO₂eq, respektive 415 Mio. t CO₂eq

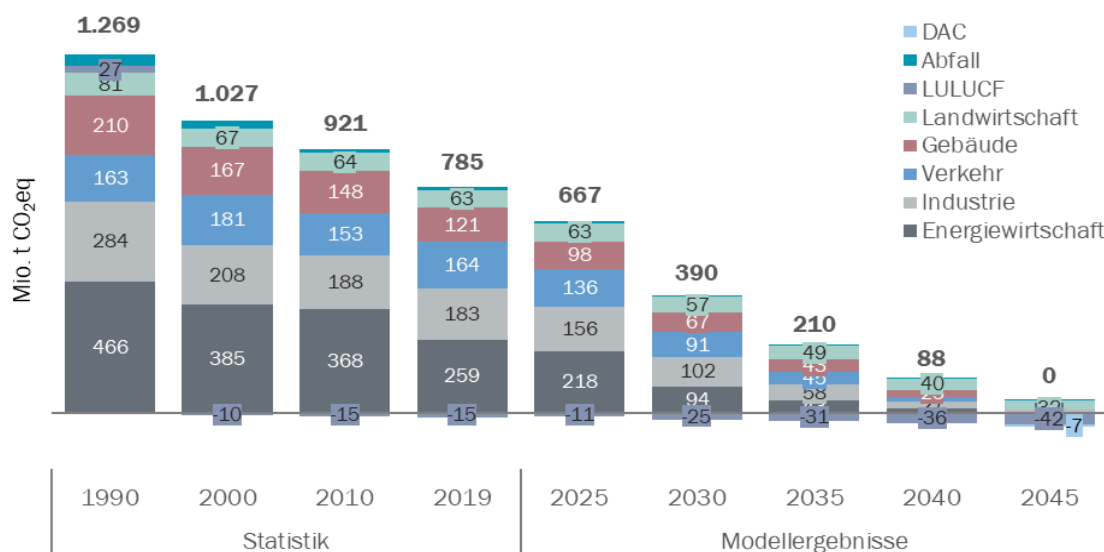
⁷ Eine Sensitivität zur Bevölkerung im Projektionsbericht 2024 der Bundesregierung zur Entwicklung der THG-Emissionen zeigt bei einer kleinen Veränderung (1-2 %) einen näherungsweisen proportionalen Zusammenhang zwischen Bevölkerung und THG-Emissionen.

ohne die Senkenwirkung des LULUCF-Sektors⁸ (-67 % ggü. 1990). Die Zielerreichung in den einzelnen Sektoren fällt unterschiedlich aus:

- Im Industrie- und im Umwandlungssektor werden die Sektorziele von 118 Mio. t CO₂eq respektive 108 Mio. t CO₂eq deutlich unterschritten.
- Im Gebäudesektor wird das Ziel für 2030 von 67 Mio. t CO₂eq knapp erreicht.
- Im Verkehrssektor wird das Ziel für 2030 von 85 Mio. t CO₂eq mit dem vorgeschlagenen Maßnahmenpaket noch knapp verfehlt, allerdings wird das Ziel im Jahr 2031 erreicht.

Bis zum Jahr 2045 werden unter Einbezug von natürlichen und technischen Senken die THG-Emissionen auf netto-null gesenkt (Abbildung 1).

Abbildung 1: Roadmap-Szenario: THG-Emissionen nach Sektoren, 1990 bis 2045, in Mt CO₂eq, inkl. der Emissionen bzw. Senkenwirkung des LULUCF-Sektors

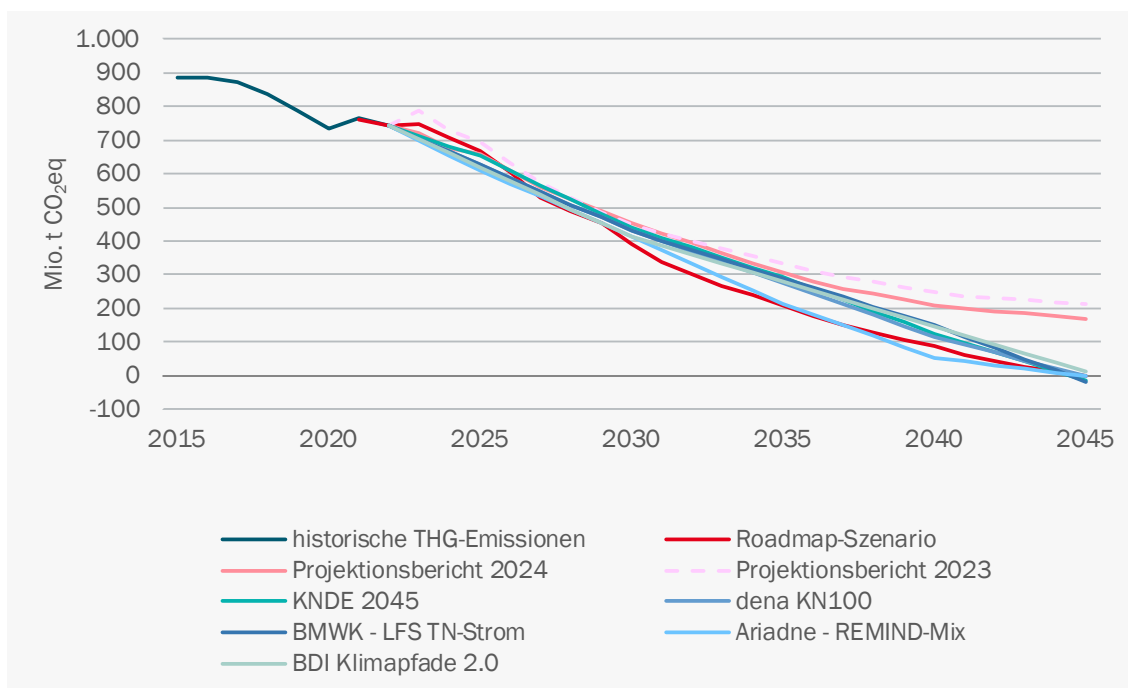


Quelle: Prognos 2023

In der nachfolgenden Abbildung 2 wird die Entwicklung der THG-Emissionen im Roadmap-Zielszenario mit der Emissionsentwicklung in anderen Klimaschutzszenarien sowie mit der Entwicklung im Projektionsbericht 2024 (Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS)) verglichen. Bis zum Jahr 2030 ist der Klimaschutz im Roadmap-Szenario leicht ambitionierter als in den Vergleichsszenarien und die THG-Emissionen liegen im Jahr 2030 mit 390 Mio. t CO₂eq am unteren Rand. Die Streuung zwischen den Szenarien ist jedoch gering und auch das MMS-Szenario des Projektionsberichts, bei dem es sich im Gegensatz zu den übrigen Energieszenarien nicht um ein Zielszenario handelt, verringern sich die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 auf nur noch 450 Mio. t CO₂eq. Nach 2030 nehmen die THG-Emissionen in allen Szenarien weiter ab, bis zum Jahr 2045 werden sie in allen Zielszenarien auf null beziehungsweise nahezu null gesenkt. Im Szenario MMS des Projektionsberichts 2024 verbleiben im Jahr 2045 Restemissionen im Umfang von knapp 160 Mio. t CO₂eq.

⁸ LULUCF: Land use, land use change and forestry

Abbildung 2: Szenarienvergleich – Entwicklung der THG-Emissionen im Roadmap-Szenario im Vergleich zur Entwicklung der THG-Emissionen in anderen Energieszenarien, in Mt CO₂eq, inkl. der Emissionen bzw. Senkenwirkung des LULUCF-Sektors



Quellen: Prognos 2023, (BCG 2021), (Agora Energiewende 2021), (Fraunhofer ISI et al. 2022; dena 2021), (UBA 2024c; Kopernikus Projekt Ariadne 2021),

2.1.3 Klimaschutzinvestitionen - insgesamt und nach Sektoren

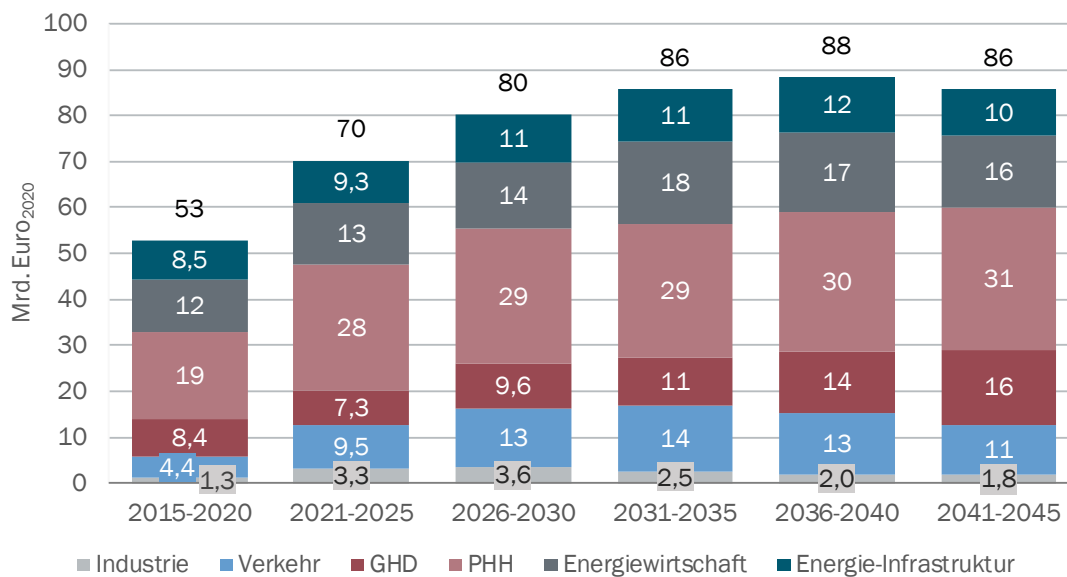
Die Klimaschutzinvestitionen werden aus dem Mengengerüst der mit den Bottom-up-Modellen erstellten Energieszenarien hergeleitet. Dazu werden die jährlichen Zugänge an Anlagen, Fahrzeugen, Wärmeerzeugern, Geräten nach Technologien unterschieden und mit technologiespezifischen Kosten monetär bewertet. Berücksichtigt werden auch Effizienzmaßnahmen, z. B. energetische Gebäudesanierungen oder das Erfüllen von Effizienzstandards bei Neubauten. Dabei basiert das Mengengerüst im Ex-Post-Zeitraum (bis 2020) in vielen Bereichen auf statistischen Daten, z. B. bei den Neuzulassungen im Pkw-Bereich, der installierten Mengen an EE-Anlagen oder den neugebauten Wohnflächen. Bei den Technologiekosten wird berücksichtigt, dass sich die Preise im Zeitverlauf verändern, z. B. aufgrund von Lernkurven. Alle Investitionen werden in realen Preisen mit dem Basisjahr 2020 ausgewiesen.

Für den Zeitraum 2015-2020 ergeben sich mittlere jährliche Klimaschutzinvestitionen im Umfang von 53 Mrd. Euro₂₀₂₀. Der Großteil der Klimaschutzinvestitionen fällt in den Sektoren Gebäude (Private Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)) sowie im Energiesektor (Energiewirtschaft und Energieinfrastruktur) an. Dahinter stehen insbesondere Investitionen zur energetischen Modernisierung von Gebäudehüllen, der Ersatz fossiler Wärmeerzeuger sowie der Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion mit Wind- und PV-Anlagen.

Im Referenzpfad steigen die jährlichen Klimaschutzinvestitionen an, im Zeitraum 2026-2030 liegen sie im Mittel bei 80 Mrd. Euro₂₀₂₀, nach 2030 im Mittel bei annähernd 90 Mrd.

Euro₂₀₂₀ (Abbildung 3). Dies entspricht einem BIP-Anteil von etwas mehr als 2 %. Wichtiger Treiber für den Anstieg ist die Umsetzung des 2019 verabschiedeten Klimaschutzprogramms 2030, inklusive des nationalen Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) sowie der Ausbau der Förderung von Klimaschutzmaßnahmen. Die Klimaschutzinvestitionen wachsen in allen Sektoren an. Der Großteil der Klimaschutzinvestitionen fällt auch in den Jahren nach 2020 in den Sektoren Gebäude und Energie (Energiewirtschaft und Energieinfrastruktur) an, während sich für den Industriesektor in der Referenzentwicklung vergleichsweise geringe Klimaschutzinvestitionen ergeben.

Abbildung 3: Jährliche Klimaschutzinvestitionen im Referenzszenario, gemittelt über 5-Jahresperioden, in Mrd. Euro₂₀₂₀



Quelle: Prognos

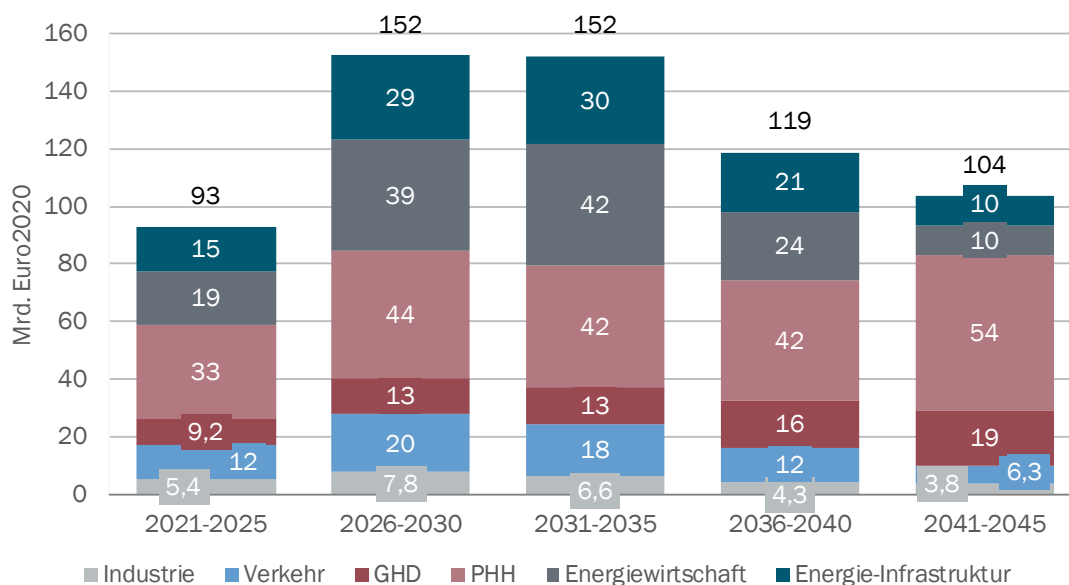
Eine Aufteilung der Klimaschutzinvestitionen nach **öffentlichen und privaten Investitionen** wurde nicht vorgenommen. In einer Kurzstudie der Prognos AG für die KfW wurde diese Aufteilung analysiert.⁹ Demnach handelt es sich in den Sektoren Industrie und Private Haushalte (nahezu) ausschließlich um private Investitionen (Prognos 2022). Im Sektor GHD liegt der Anteil der öffentlichen Investitionen bei rund 20 %, diese sind hauptsächlich auf Klimaschutzmaßnahmen an öffentlichen Gebäuden zurückzuführen. Im Verkehrssektor wird der Anteil öffentlichen Klimaschutzinvestitionen auf ca. 10 % geschätzt, wobei diese im Bereich Schienenverkehr und für den Ausbau der Ladeinfrastruktur anfallen. Für die Stromnetze wurde ein öffentlicher Anteil von 10 % abgeschätzt, für die erneuerbare Stromproduktion von knapp 50 %. Den öffentlichen Investitionen wurden dabei anteilig Investitionen von Unternehmen zugerechnet, welche sich anteilig im Besitz der öffentlichen Hand befinden.

⁹ In der Studie für die KfW wurde eine andere Definition für Klimaschutzinvestition gewählt. Dies gilt es beim Vergleich der Investitionen zu vergleichen. Auf die Einordnung der Anteile der öffentlichen Investitionen dürfte die unterschiedliche Abgrenzung keinen wesentlichen Einfluss haben.

Im Zielszenario (Roadmap-Szenario) steigen die Klimaschutzinvestitionen deutlich stärker an als in der Referenz (Abbildung 4). Im Zeitraum 2026 bis 2035 liegen sie im Mittel der Jahre bei rund 150 Mrd. Euro₂₀₂₀. Dies entspricht annähernd einer Verdreifachung im Vergleich zum Zeitraum 2015-2020 (+187 %). Ab dem Jahr 2030 werden die jährlichen Klimaschutzinvestitionen insgesamt wieder leicht rückläufig. In der Periode 2041-2045 liegt das Jahresmittel bei rund 100 Mrd. Euro₂₀₂₀. Das sind dann immer noch rund doppelt so viel wie im Zeitraum 2015-2020.

Im Gegensatz zu den übrigen Sektoren steigen die Klimaschutzinvestitionen im Gebäudesektor (PHH, GHD) in der Periode 2041-2045 vorübergehend wieder an. Dies ist auf die im Roadmap-Szenario unterstellte vorzeitige Außerbetriebnahme von Gasheizungen zurückzuführen. Um die THG-Emissionen bis zum Jahr 2045 im Gebäudesektor auf null zu senken, werden diese Anlagen im Roadmap-Szenario – unabhängig von ihrer technischen Lebensdauer – bis zum Jahr 2045 durch klimaneutrale Heizungen ersetzt.¹⁰ Dies führt vorübergehend zu erhöhten Austauschmengen, welche mit höheren Investitionen verbunden sind. Nach 2045 werden auch im Gebäudesektor die Klimaschutzinvestitionen rückläufig.

Abbildung 4: Jährliche Klimaschutzinvestitionen im Zielszenario, gemittelt über 5-Jahresperioden, in Mrd. Euro₂₀₂₀



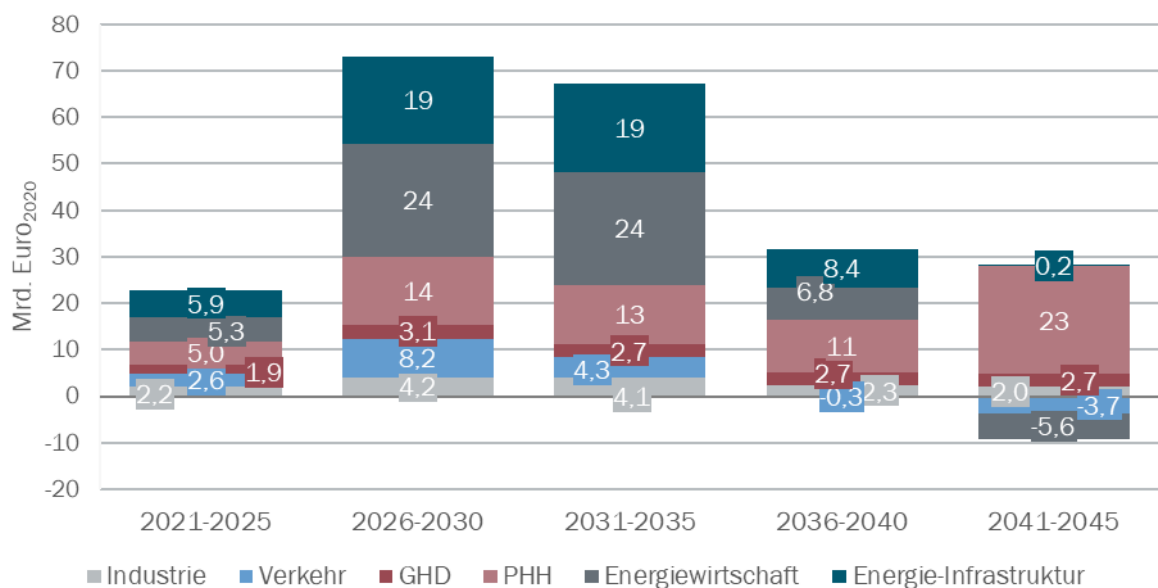
Quelle: Prognos

Die im Zielszenario im Vergleich zum Referenzszenario zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen sind in der Abbildung 5 nach Sektoren dargestellt. Diese Differenzinvestitionen fließen im Nachgang als Investitionsimpulse in die makroökonomische Modellierung ein. In der Periode 2021 bis 2025 sind die Differenzen noch gering (im Mittel +23 Mrd.

¹⁰ Es wird im Roadmap-Szenario davon ausgegangen, dass auch langfristig nur begrenzte Mengen an Biomethan verfügbar sein werden. Die Menge an verfügbarem grünem Wasserstoff ist ebenfalls begrenzt und der Wasserstoff bleibt im Vergleich zu anderen Energieträgern teuer. Aus diesen Gründen werden Gasheizungen im Szenario nicht als Lösungsoption betrachtet.

Euro₂₀₂₀/a). Nach 2025 steigen die zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen stark an und liegen im Zeitraum 2026-2035 bei rund 70 Mrd. Euro₂₀₂₀/a. Der Großteil der Differenz ist auf den beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung zurückzuführen (PV, Wind) sowie auf den damit verbundenen Ausbau der Stromnetzinfrastuktur. Auch im Gebäudesektor (PHH und GHD) steigen die Klimaschutzinvestitionen deutlich an und liegen im Zeitraum 2026-2035 rund 40 % höher. Im Referenzszenario entfällt der Großteil der Klimaschutzinvestitionen des Gebäudesektors auf Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle. Die zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen im Gebäudesektor entfallen hauptsächlich auf den Hochlauf der Wärmepumpen. Im Verkehrssektor entfallen die zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen im Zielszenario überwiegend auf den Aufbau der Ladeinfrastruktur. Im Referenzszenario erfolgt ebenfalls ein Aufbau einer Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, dieser erfolgt jedoch zeitlich verzögert (im Vergleich zum Zielszenario). Im Bereich der Pkw zeigen sich in Bezug auf die Investitionen nur geringe Unterschiede zwischen den Szenarien. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Anschaffungskosten von Elektroantrieben und Verbrennungsmotoren stark annähern und in den Szenarien etwa ab 2030 die Kosten für Elektroantriebe geringer sind als für Verbrennungsmotoren.

Abbildung 5: Differenz der jährlichen Klimaschutzinvestitionen, Zielszenario im Vergleich zum Referenzszenario, gemittelt über 5-Jahresperioden, in Mrd. Euro₂₀₂₀



Quelle: Prognos

Im Industriesektor fallen im Roadmap-Zielszenario jährliche Klimaschutzinvestitionen von rund 7 Mrd. Euro₂₀₂₀ an (im Zeitraum 2026 bis 2035). Die Differenzinvestitionen zur Referenz liegen bei rund 4 Mrd. Euro₂₀₂₀. Im Vergleich zu den übrigen Sektoren fallen die Klimaschutzinvestitionen gering aus.

Nach 2035 nimmt der Investitionsbedarf im Roadmap-Szenario wieder ab und auch die Differenzinvestitionen zur Referenzentwicklung werden wieder kleiner. Die jährlichen Klimaschutzinvestitionen sind im Zeitraum 2036-2040 im Roadmap-Szenario noch rund

30 Mrd. Euro₂₀₂₀ höher als in der Referenzentwicklung, im Zeitraum 2041-2045 noch rund 20 Mrd. Euro₂₀₂₀. Ab etwa dem Jahr 2040 sind die Klimaschutzinvestitionen im Roadmap-Szenario in den Sektoren Energiewirtschaft und Verkehr geringer als in der Referenzszenario.

2.1.4 Klimaschutzbezogene Gesamtinvestitionen

Im Gegensatz zu den Klimaschutzinvestitionen beinhalten die klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen auch die Investition für die Referenztechnologie (siehe Kapitel 2.1.1). Die klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen geben Auskunft über das Investitionsvolumen, das insgesamt im Laufe der Transformation umgeschlagen werden muss, inklusive derjenigen Investitionen, die ohnehin getätigt werden, wie z.B. der Neubau von Gebäuden, Heizungen, Pkw und Produktionsanlagen. Dadurch ermöglichen sie Aussagen zur Entwicklung des Investitionsbedarfs im Zeitverlauf und im Vergleich zum aktuellen Zeitraum 2015-2020.

Am aktuellen Rand liegen die bei der Modellierung des Energiesystems erfassten Investitionen in Sachgüter in der Größenordnung von 280 bis 290 Mrd. Euro₂₀₂₀/a (Abbildung 6). Bis zum Jahr 2030 steigt das Investitionsvolumen im Roadmap-Szenario auf über 400 Mrd. Euro₂₀₂₀. Nach 2030 sinkt der Investitionsbedarf wieder ab und liegt im Jahr 2045 mit rund 310 Mrd. Euro₂₀₂₀ nur noch unwesentlich über dem Niveau der Jahre 2015/2020.

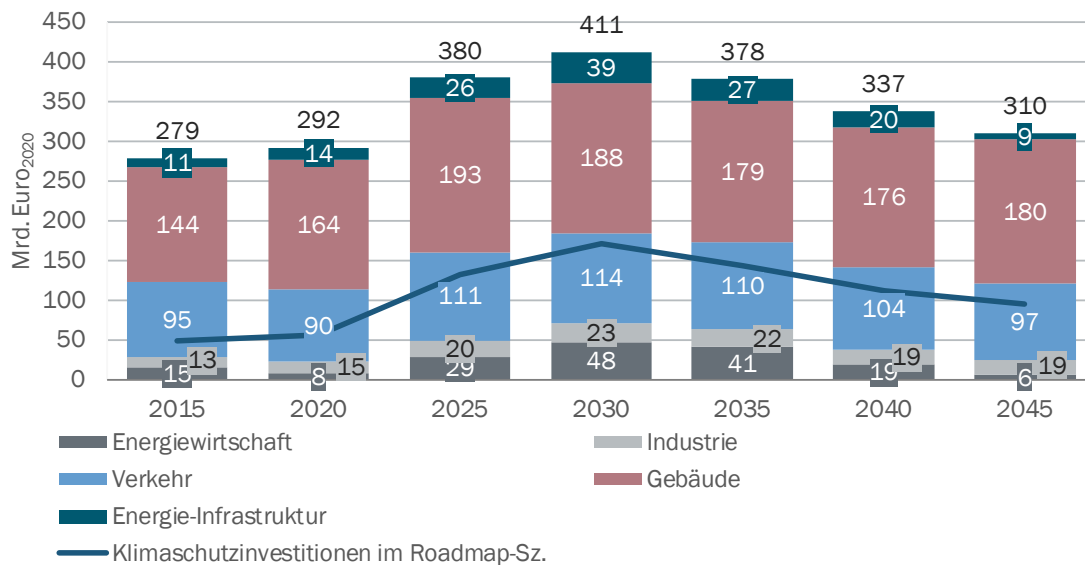
Am größten ist der Investitionsbedarf im Gebäudesektor, der Anteil des Gebäudesektors an den erfassten Investitionen beläuft sich auf rund 50 %. Darin enthalten sind Investitionen in den Neubau, energetische Sanierungen, Wärmeerzeuger, aber auch in Elektrogeräte, Haustechnikanlagen und gewerbliche Produktionsanlagen.

Bei der Betrachtung der klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen ist auch der Verkehrssektor von hoher Bedeutung. Die jährlichen Investitionen liegen im Bereich von 100-115 Mrd. Euro₂₀₂₀. Diese beinhalten Investitionen in neue Pkw, Nutzfahrzeuge, Busse, aber auch in den Aufbau der Ladeinfrastruktur. Nicht enthalten sind Investitionen in den Straßenbau.

Im Bereich Energiewirtschaft entsprechen die klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen aufgrund der gewählten Abgrenzung den Klimaschutzinvestitionen. Im Bereich Energieinfrastruktur beinhalten die klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen auch Investitionen in fossile Energieinfrastruktur (u.a. Raffinerien, Gasnetz), dadurch fallen die Gesamtinvestitionen etwas höher aus als die Klimaschutzinvestitionen.

Insgesamt liegen die klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen im Zeitraum 2025-2045 um etwa den Faktor drei höher als die Klimaschutzinvestitionen.

Abbildung 6: Klimaschutz- bzw. energiesystembezogene Gesamtinvestitionen im Roadmap-Szenario nach Sektoren sowie die Klimaschutzinvestitionen (Linie), in Mrd. Euro₂₀₂₀



Quelle: Prognos

Bei der Modellierung des Energiesystems werden nicht die gesamten Investitionen der Volkswirtschaft erfasst. Gemäß der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) beliefen sich die jährlichen Bruttoanlageinvestitionen im Mittel der Jahre 2018–2022 auf rund 730 Mrd. Euro₂₀₂₀ (StBA 2024c). Der Anteil der klimaschutzbezogenen Gesamtinvestitionen (d.h. die Klimaschutzinvestitionen inkl. der ohnehin zu tätigen Investitionen) an den Bruttoanlageinvestitionen beläuft sich im Zeitraum 2025 bis 2045 im Roadmap-Szenario auf 40 % bis 50 %. Das bedeutet, dass etwa 40 % bis 50 % der Investitionsgüter (z. B. Gebäude, Fahrzeuge, Kraftwerke, Produktionsanlagen) für die Transformation zur Klimaneutralität relevant sind und entsprechende Technologien (wie Wärmeschutz, E-Fahrzeuge, effiziente Produktionsanlagen) bei Ersatz- und Neuinvestitionen von Klimaschutzmaßnahmen betroffen sind.

Der Anteil der berechneten Klimaschutzinvestitionen an den Bruttoanlageinvestitionen liegt am aktuellen Rand bei 8 %. Durch den Anstieg der Klimaschutzinvestitionen erhöht sich im Roadmap-Szenario der Anteil an den Bruttoanlageinvestitionen bis 2030 auf annähernd 20 % und nimmt dann aber wieder ab (Anteile jeweils bezogen auf die Entwicklung im Szenario 5, vgl. Kapitel 4).

Eine weitergehende Beschreibung der Klimaschutzinvestitionen im Roadmap-Szenario finden sich in der Studie Klimaschutzinvestitionen für die Transformation des Energiesystems, nach Sektoren und Anwendungen (Prognos 2024).

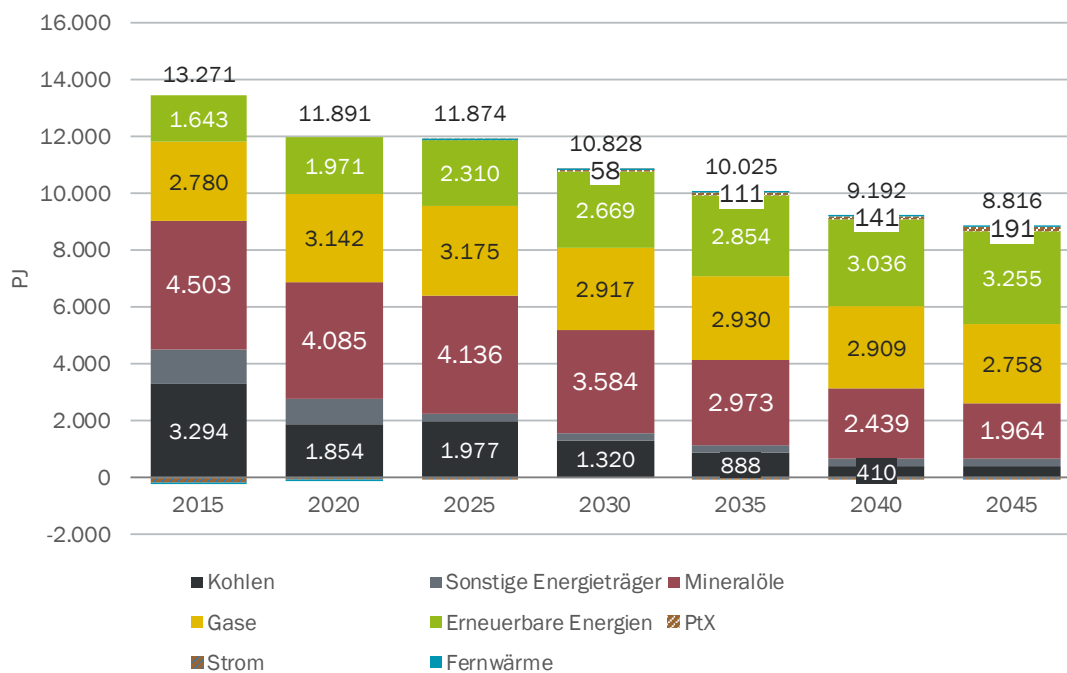
2.1.5 Energieverbrauch und Energieausgaben

Die Ausgaben für Energie werden durch die Verknüpfung von Energieverbrauch (physikalische Menge) und dem Preis für die konsumierte Energie berechnet. Die Energieeffizienz- und Klimaschutzmaßnahmen tragen im Referenzszenario zu einer deutlichen Abnahme des Primärenergieverbrauchs bei. Im Zeitraum 2015 bis 2030 verringert er sich

um 18 %, bis zum Jahr 2045 nimmt der Primärenergieverbrauch um 34 % ab und beträgt dann noch 8.816 PJ (Abbildung 7).¹¹ Überproportional ist der Rückgang im Zeitraum 2015 bis 2045 bei den Mineralölen (-56 %) sowie bei der Kohle (-88 %). Der Verbrauch an Erdgas verändert sich hingegen nur wenig.

Im Roadmap-Szenario (Zielszenario) führen die zusätzlichen politischen und technischen Maßnahmen zu einem verstärkten Rückgang des Primärenergieverbrauchs (Abbildung 8). Im Jahr 2030 liegt der Primärenergieverbrauch um 27 % unter dem Verbrauch im Jahr 2015 (-22 % ggü. 2022); bis zum Jahr 2045 erhöht sich der Rückgang auf 46 %.¹² Gleichzeitig verschiebt sich die Struktur der eingesetzten Energieträger sehr stark. Im Jahr 2045 werden fast ausschließlich erneuerbare Energie und in geringerem Ausmaß synthetische Energieträger (PtX, inkl. Wasserstoff) eingesetzt. Der Verbrauch von Erdgas und Mineralölen fällt auf nahezu null. Der Großteil der verbleibenden Verbrauchsmengen wird für nichtenergetische Zwecke eingesetzt (Herstellung von Produkten). Aufgrund des Verbrauchsrückgangs an fossilen Energien nehmen auch die Energieimporte im Szenario deutlich ab.

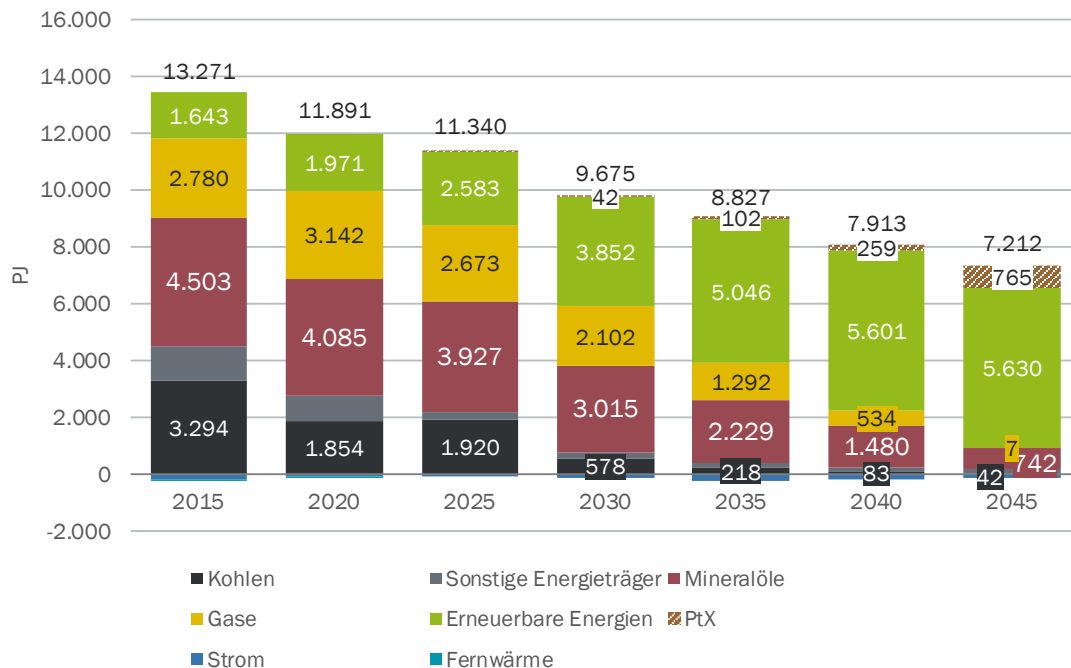
Abbildung 7: Referenzszenario: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ



Quelle: Prognos

¹¹ Für den Zeitraum 2022 bis 2030 ergibt sich im Referenzszenario eine Reduktion um 14 %.

¹² In den ausgewiesenen Verbrauchsmengen ist der Nichtenergetischen Verbrauch mitenthalten, ebenso der Verbrauch an Solar- und Umweltwärme. Von den PtX-Mengen entfällt im Jahr 2045 knapp 40 % auf Wasserstoff, der Rest überwiegend auf synthetisches Kerosin für den Flugverkehr.

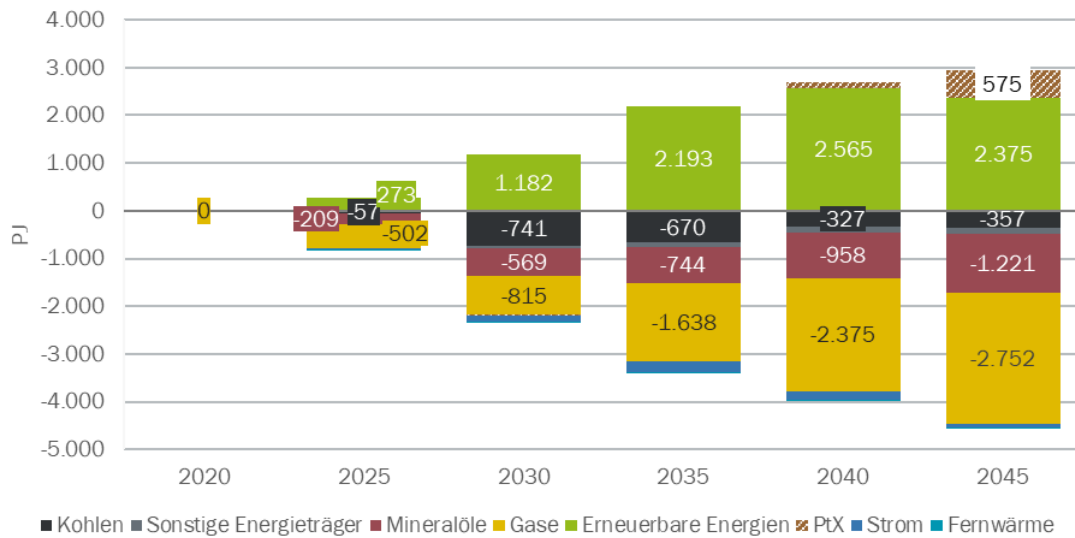
Abbildung 8: Roadmap-Szenario (Zielszenario): Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ

Quelle: Prognos

In Abbildung 9 ist die im Roadmap-Szenario im Vergleich zur Referenzentwicklung eingesparte Primärenergie nach Energieträgern dargestellt (negative Werte entsprechen einer Verbrauchsreduktion, positive Werte einem Mehrverbrauch). Die Netto-Einsparungen wachsen im Zeitverlauf kontinuierlich an und belaufen sich im Jahr 2045 auf 1.600 PJ. Eingespart werden überwiegend fossile Energieträger (Erdgas und Mineralöle). Die Exporte an Strom fallen zwischenzeitlich etwas höher aus.¹³ Ein Mehrverbrauch zeigt sich bei den synthetischen Energieträgern (PtX) und auch bei den erneuerbaren Energien. Im Jahr 2045 entfallen knapp 40 % der importierten PtX-Mengen auf grünen Wasserstoff, der Rest auf synthetische Treibstoffe. Während der Wasserstoff und synthetische Treibstoffe vergleichsweise teuer sind, fallen für die erneuerbare Energie in der Regel keine direkten Energiekosten an (keine Preise für Umweltwärme, Solarstrahlung und -wärme, Wind).

¹³ Über das Jahr werden große Mengen an Strom importiert und exportiert. Da sich diese Mengen jeweils sehr stark ausgleichen, fällt der bilanzielle jährliche Stromhandelssaldo in beiden Szenarien gering aus und auch die Differenz zwischen den Szenarien bleibt gering, so dass diese Mengen in den Abbildungen kaum sichtbar werden. Im Referenzszenario schwankt das jährliche Nettoexportsaldo zwischen -18 bis +125 PJ (-5 TWh bis +35 TWh), im Roadmap-Szenario zwischen -18 bis +250 PJ (-5 TWh bis +70 TWh) – hier erfolgt der EE-Ausbau in Deutschland etwas schneller als im übrigen Europa, was zwischenzeitlich zu etwas höheren Nettoexporten führt.

Abbildung 9: Differenz im Primärenergieverbrauch nach Energieträgern, Zielszenario im Vergleich zum Referenzszenario, Jahreswerte in PJ

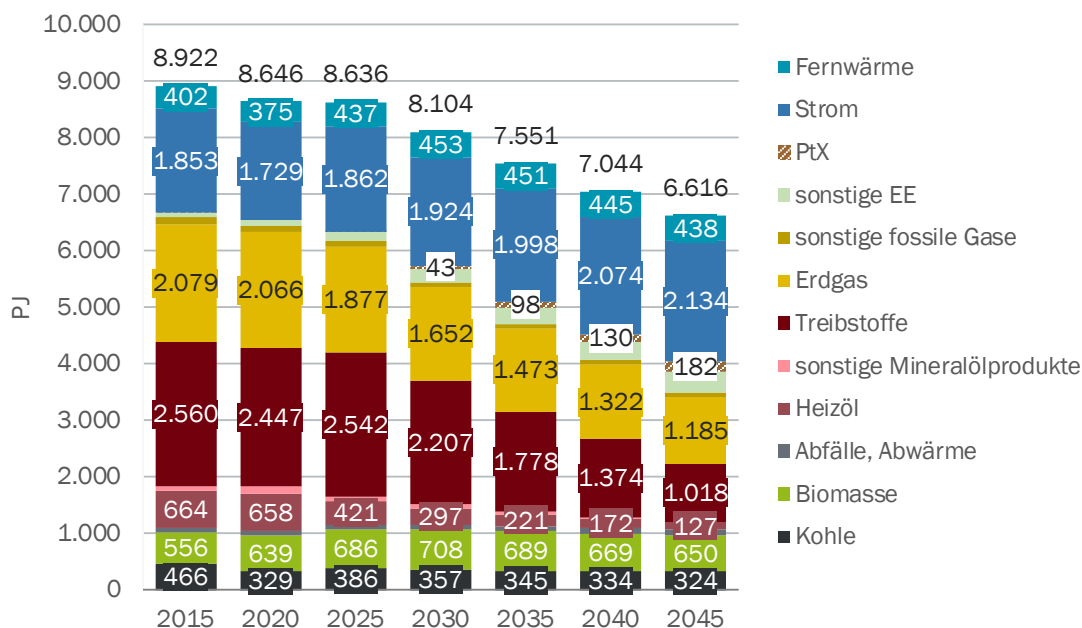


Quelle: Prognos

Die Entwicklung der Endenergieverbrauchs (Summe der Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte und GHD) im Referenzszenario ist in Abbildung 10 und im Roadmap-Szenario in Abbildung 11 dargestellt, die Differenz zwischen den Szenarien in Abbildung 10 (negative Werte entsprechen auch hier einer Verbrauchsreduktion, positive Werte einem Mehrverbrauch). Durch die verstärkte Elektrifizierung ergibt sich im Roadmap-Szenario trotz der gesteigerten Energieeffizienz ein höherer Strombedarf als im Referenzszenario. Der Stromverbrauch ist im Roadmap-Zielszenario im Jahr 2045 rund 460 PJ (128 TWh) höher als im Referenzszenario.¹⁴ Auch der Verbrauch an Fernwärme (+167 PJ), PtX (+588 PJ, davon 228 PJ Wasserstoff) und an erneuerbaren Energien (+524 PJ) ist im Roadmap-Zielszenario im Jahr 2045 höher als in der Referenzentwicklung. Demgegenüber stehen große Einsparungen bei den fossilen Treibstoffen (-1.001 PJ) und beim Erdgas (-1.168 PJ). Auch die Verbräuche von Heizöl und Kohle sind im Roadmap-Szenario etwas stärker rückläufig als in der Referenz.

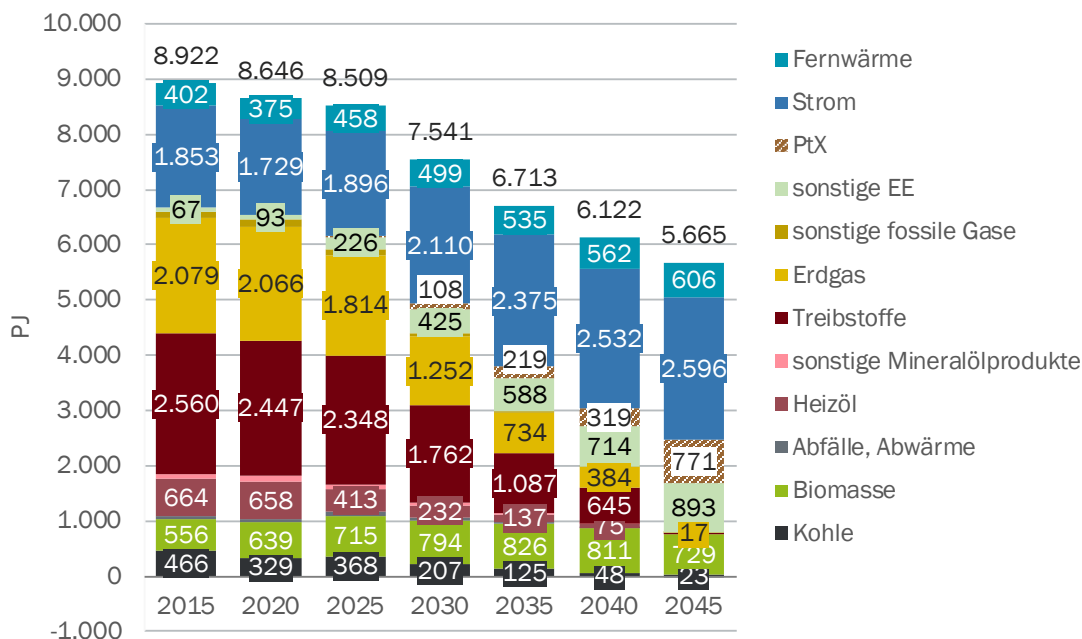
¹⁴ Beim Endenergieverbrauch nicht berücksichtigt ist der Stromverbrauch für die inländische Synthese von Wasserstoff, dies entspricht dem methodischen Vorgehen in den Energiebilanzen.

Abbildung 10: Referenzszenario: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ



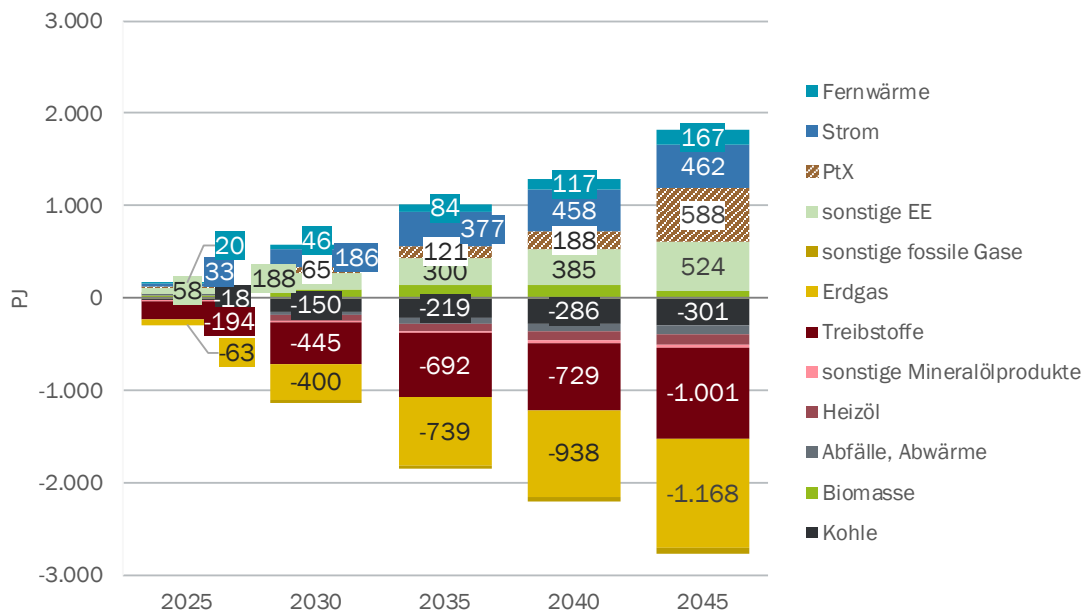
Quelle: Prognos

Abbildung 11: Roadmap-Szenario (Zielszenario): Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern, 2015 – 2045, in PJ



Quelle: Prognos

Abbildung 12: Differenz im Endenergieverbrauch nach Energieträgern, Roadmap-Szenario im Vergleich zum Referenzszenario, Jahreswerte in PJ



Quelle: Prognos

Die in den Szenarien angenommen Preise für CO₂ unterscheiden sich zwischen den Szenarien Der CO₂-Preis im nationalen EHS ist bis zum Jahr 2026 im BEHG vorgegeben. Die hier unterstellten Preisentwicklungen ab dem Jahr 2026 übernehmen die Annahmen des Projektionsberichts 2023 (Harthan et al. 2023) und der Roadmap-Energieeffizienz:

- In der Referenzentwicklung folgt der CO₂-Preis bis zum Jahr 2030 dem Projektionsbericht 2023. Nach 2030 bis zum Jahr 2045 erhöht sich der Preis linear bis auf 180 Euro₂₀₂₀/t.
- Im Roadmap-Szenario folgt der Preis bis 2030 ebenfalls dem Projektionsbericht 2023. Nach 2030 steigt der Preis im Roadmap-Szenario stärker an als in der Referenz und erhöht sich bis zum Jahr 2045 auf 220 Euro₂₀₂₀/t (Tabelle 2).

Um das Jahr 2020 lag der CO₂-Preis im EU-ETS bei rund 20 Euro/t. Für die Fortschreibung im Referenzszenario werden die Annahmen aus den Szenarien zum ersten deutschen NECP aus dem Jahr 2021 übernommen (Prognos et al. 2021). Der CO₂-Preis steigt in diesen Szenarien nur langsam an, auf 34 Euro₂₀₂₀/t im Jahr 2030 und auf 71 Euro₂₀₂₀/t im Jahr 2045. Mit der Verschärfung der THG-Reduktionsziele auf europäischer Ebene im Rahmen des Green Deals sowie der Novellierung der EU-ETS-Richtlinie sind die Preise im EU-ETS seit 2020 deutlich angestiegen. Im Juni 2024 lagen die Preise bei rund 70 Euro₂₀₂₀/t. Im Zielszenario wird eine weitere Preissteigerung unterstellt, auf knapp 100 Euro₂₀₂₀/t bis zum Jahr 2030 und auf annähernd 200 Euro₂₀₂₀/t im Jahr 2045.

Tabelle 2: CO₂-Preise im nationalen EHS (BEHG) und im EU-ETS, in Euro/t₂₀₂₀

	2020	2025	2030	2035	2040	2045
BEHG						
Referenz	0	50	105	130	155	180
Ziel	0	50	105	152	190	220
EU-ETS						
Referenz	21	25	34	43	50	71
Ziel	24	83	97	121	145	194

Quelle: Eigene Annahmen, basierend auf Roadmap Energieeffizienz 2045 und Projektionsbericht 2023

Tabelle 3: Endverbraucherpreise im Zielszenario, nach Energieträgern, in Euro₂₀₂₀/l oder in ct₂₀₂₀/kWh

	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Diesel (Euro ₂₀₂₀ /l)	1,18	1,68	1,84	1,96	2,06	2,13
Benzin (Euro ₂₀₂₀ /l)	1,38	1,65	1,78	1,88	1,96	2,02
Heizöl	5,6	9,1	11,2	13,0	14,4	15,6
Erdgas	7,1	11,7	12,5	13,7	14,7	15,5
Fernwärme (PHH)	10,9	12,0	12,0	12,7	13,4	14,1
Fernwärme (GHD)	8,6	9,3	9,3	9,8	10,4	10,9

Quelle: Eigene Annahmen, basierend auf Roadmap Energieeffizienz 2045

Die Endverbrauchpreise für Treibstoffe, Heizöl und Erdgas hängen unter anderem ab von der Entwicklung der Grenzübergangspreise, der Vertriebsmarge sowie Steuern und Abgaben. Die im Roadmap-Szenario (Zielszenario) unterstellten Endverbraucherpreise sind in Tabelle 3 beschrieben. Dabei sind die in Tabelle 2 dargestellten CO₂-Preise im BEHG berücksichtigt. Als Vereinfachung werden die Grundpreise auch für die Berechnung der Energieausgaben im Referenzszenario übernommen.

Die Entwicklung der Strompreise der beiden Szenarien ist in Tabelle 4 nach Sektoren dargestellt. Bei Industriekunden wird unterschieden nach energieintensiven und nicht energieintensiven Branchen.¹⁵ Die beschriebenen Strompreise sind Ergebnisse der Strommarktmodellierung der jeweiligen Szenarien. Die Preise werden unter anderem beeinflusst durch die Entwicklung der Brennstoff- und CO₂-Preise, des Kraftwerks- und EE-Zubaus im In- und Ausland, der Entwicklung der Stromnachfrage, aber auch durch die Entwicklung des Angebots an Energiespeichern und Flexibilisierungsoptionen. Die Preise verstehen sich als gemittelte Jahreswerte.

¹⁵ Die nicht energieintensive Branchen entsprechen dem Abnahmefall Industrie 5 (100.000 MWh/a, Hochspannung). Die energieintensiven Branchen (z. B. Chemie, Stahl) entsprechen dem Abnahmefällen 6 und 7).

Tabelle 4: Strompreise in den Szenarien nach Sektoren, in ct₂₀₂₂/kWh

	2023	2025	2030	2035	2040	2045
Referenz						
Private Haushalte	34,2	30,0	27,2	28,8	29,6	30,0
GHD*	27,2	21,1	18,1	19,5	20,0	20,2
Industrie - nicht energieintensiv	19,2	12,9	9,6	10,4	10,1	9,8
Industrie - energieintensiv**	13,9	8,7	6,1	6,9	6,6	6,3
Zielszenario						
Private Haushalte	36,2	33,4	32,0	33,2	34,7	33,4
GHD*	29,3	23,5	21,2	22,3	23,2	22,5
Industrie - nicht energieintensiv	21,4	15,2	11,6	11,2	11,0	10,0
Industrie - energieintensiv**	16,1	11,1	7,7	7,2	7,1	6,3

* GHD: Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

** Abnahmefälle ohne Strompreiskompensation

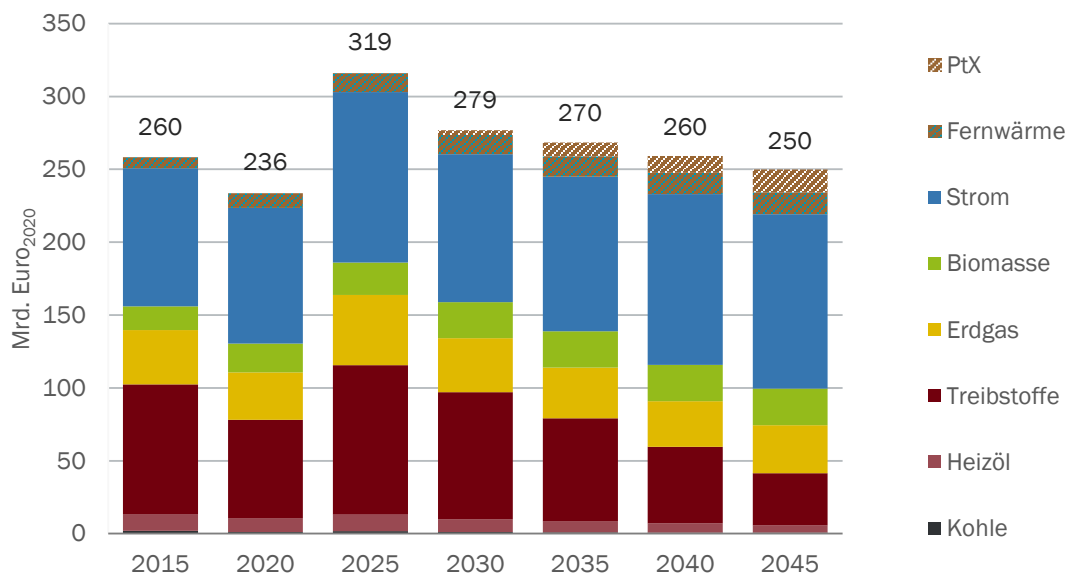
Quelle: Eigene Berechnungen Prognos

Die Preisbildung auf dem Strommarkt erfolgt nach dem sogenannten Merit-Order-Prinzip. Das bedeutet, dass die Grenzkosten – im Wesentlichen Brennstoff- und CO₂-Kosten – des letzten noch benötigten Kraftwerks in der jeweiligen Stunde den Strompreis in dieser Stunde bestimmen. Da in vielen europäischen Strommärkten die letzten Kraftwerke zur Deckung der Last oft Gaskraftwerke sind und diese dem EU-ETS unterliegen, wirkt sich eine Veränderung der CO₂-Preise in der Regel direkt auf die Strompreise aus. Die höheren Strompreise im Roadmap-Zielszenario im Vergleich zur Referenz erklären sich hauptsächlich durch die höheren CO₂-Preise. Der verstärkte Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Wind, PV) dämpft den CO₂-Preiseffekt. Mit zunehmendem EE-Anteil an der Stromerzeugung nimmt der Effekt durch die hohen CO₂-Preise ab. Im Jahr 2045 liegen die Strompreise im Zielszenario nur noch geringfügig höher als im Referenzszenario.

Aus der Verknüpfung der verbrauchten Energiemengen nach Energieträgern (Abbildung 10 und Abbildung 11) und den jeweiligen Energiepreisen (Tabelle 3 und Tabelle 4) werden die Ausgaben für Energie berechnet. Die jährlichen Energieausgaben im Referenzszenario sind in Abbildung 13 beschrieben, die Differenz der Energieausgaben zwischen dem Referenzszenario und dem Roadmap-Szenario ist in Abbildung 13 abgebildet. Im Referenzszenario werden im Mittel der Jahre 2020 bis 2045 in den Endverbrauchssektoren Gebäude, Verkehr und Industrie jährlich rund 270 Mrd. Euro für den Bezug von Energie ausgegeben. Eingespart werden im Roadmap-Szenario (im Vergleich zum Referenzszenario) Ausgaben für Erdgas, fossile Treibstoffe und Heizöl. Außerdem sind die gesteigerte Energieeffizienz und der dadurch reduzierte Energieverbrauch eine Ursache für die geringeren Energieausgaben. Höhere Ausgaben ergeben sich beim Stromverbrauch, was u. a. auf die höheren CO₂-Preise zurückzuführen ist, und bei der Fernwärme sowie für synthetische Treibstoffe, welche insbesondere im Flugverkehr eingesetzt werden. In den Jahren bis 2040 ergeben sich im Roadmap-Szenario insgesamt niedrigere

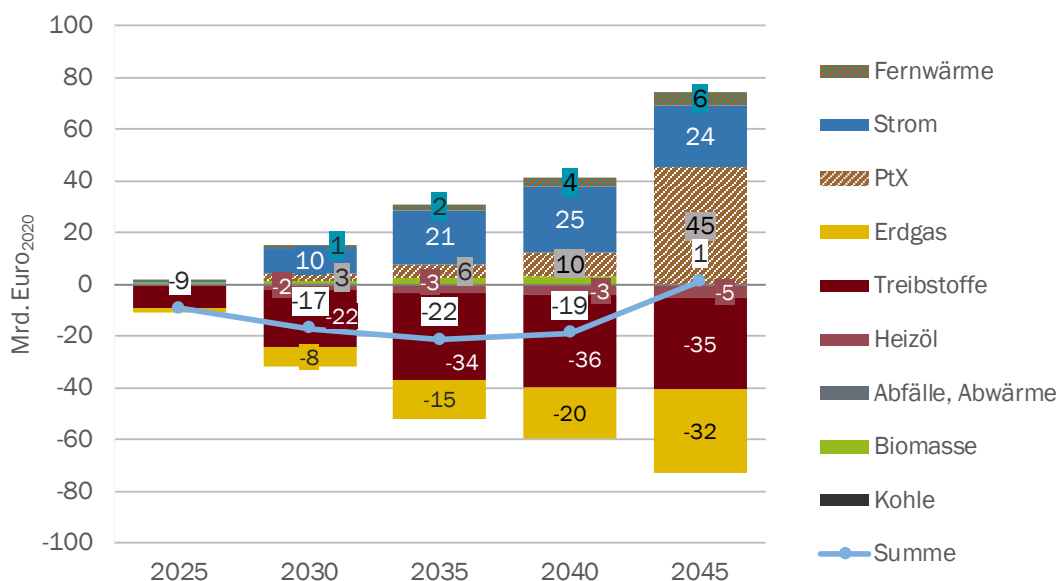
Energiekosten um 15-20 Mrd. Euro jährlich. Nach 2040, mit dem hohen Einsatz synthetischer Energieträger verringern sich die Einsparungen, bis im Jahr 2045 die Energieausgaben in beiden Szenarien in etwa gleich hoch sind.

Abbildung 13: Energieausgaben für den Endverbrauch nach Energieträgern im Referenzszenario, in Mrd. Euro₂₀₂₀



Biomasse inkl. Holz, Bio-Treibstoffe; Quelle: Prognos

Abbildung 14: Differenz der jährlichen Energieausgaben für den Endverbrauch nach Energieträgern; Roadmap-Szenario (Zielszenario) im Vergleich zum Referenzszenario, in Mrd. Euro₂₀₂₀



Quelle: Prognos

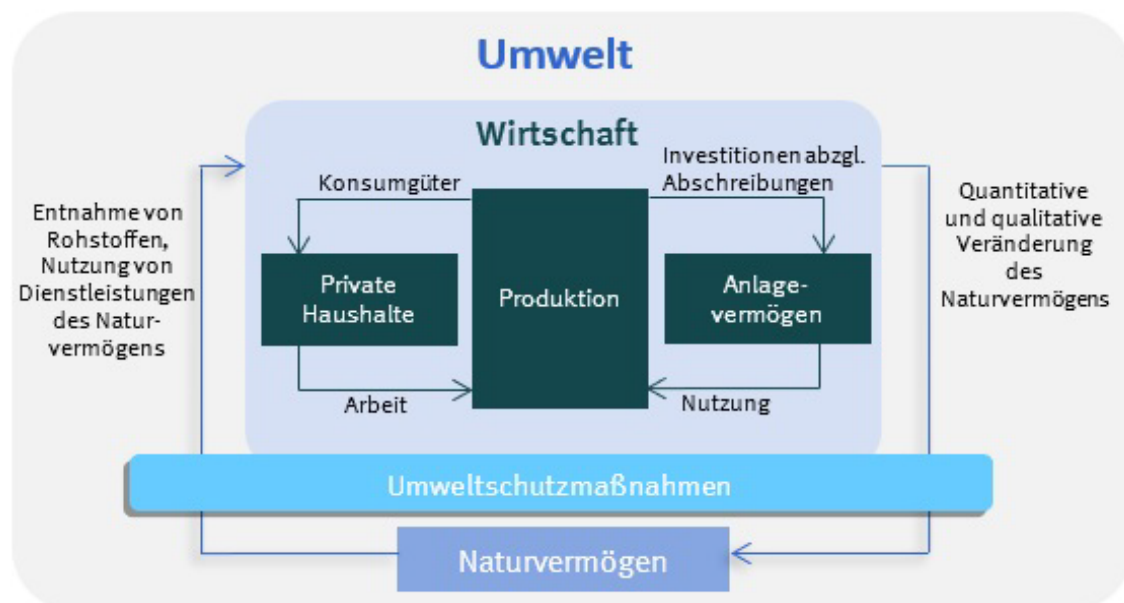
2.1.6 Abgleich mit der Umweltökonomischen Gesamtrechnung

Es gibt bis heute keine offizielle Statistik, welche die Investitionen in Klimaschutz vollständig erfasst und abbildet. Punktuelle Angaben zu Klimaschutzinvestitionen finden sich in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) des statistischen Bundesamtes. Im nachfolgenden Unterkapitel wird der methodische Ansatz in den UGR kurz erläutert und die ausgewiesenen Klimaschutzinvestitionen mit den eigenen Abschätzungen verglichen.

Zweck und Aufbau der UGR

Die UGR wollen die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Wirtschaft beschreiben und damit eine Datengrundlage zur Abschätzung von Politikfolgen und weiteren Analysen schaffen. Dazu werden die Aspekte Umwelt-Belastung, Umwelt-Zustand und Umweltschutz-Maßnahmen unterschieden und strukturiert und aufeinander abgestimmt abgebildet (Abbildung 15).

Abbildung 15: Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Wirtschaft



Quelle: Statistisches Bundesamt (StBA 2024a)

- Der Aspekt Umwelt-Belastung wird hauptsächlich über physische Stromgrößen zwischen der Umwelt und der Wirtschaft abgebildet, dies beinhaltet bisher Material- und Rohstoffflüsse, die Energiegesamtrechnung, die Luftemissionsberechnung und die Wassergesamtrechnung.
- Der Aspekt Umwelt-Zustand beinhaltet Bilanzen zur Fläche und zur Entwicklung der Flächennutzung. Die Flächenbilanz wird ergänzt durch eine Zustandsbilanz. Diese enthält für jeden unterschiedenen Ökosystemtyp Angaben zu dessen Zustand.
- Der Aspekt Umweltschutz-Maßnahmen erfasst Maßnahmen, die eine Vermeidung, Verringerung oder Beseitigung von Umweltbelastungen und allen anderen Formen von Umweltschädigungen zum Ziel haben. Dies beinhaltet beispielsweise

Ausgaben für Umweltschutz, umweltbezogene Steuern, Ausgaben für Emissionsberechtigungen, aber auch Subventionen, die umwelt- bzw. ressourcenschonendes Verhalten anreizen. Die Abbildung der erfassten monetären Ströme findet in enger Abstimmung mit den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen statt.

Um eine länder- und themenübergreifende Vergleichbarkeit zu ermöglichen, sind die UGR einerseits kompatibel mit der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) des statistischen Bundesamtes und basieren andererseits auf dem international vereinbarten SEEA-Standard (System of Environmental Economic Accounting).

Der Aufbau der UGR ist detailliert beschrieben in den statischen Berichten zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (StBA 2024a).

Abbildung von Klimaschutzinvestitionen

Angaben zu Klimaschutzinvestitionen finden sich in der Umweltschutzausgabenrechnung (Aspekt Umweltschutz-Maßnahmen). Darin enthalten sind sowohl Investitionen des Staates, der Unternehmen und Privathaushalte, als auch laufende Ausgaben zum Schutz der Umwelt. Im aktuellen Statistischen Bericht zu den UGR¹⁶ werden die Umweltschutzausgaben in folgende Umweltbereiche unterteilt:

- Luftreinhaltung und Klimaschutz
- Abwasserwirtschaft
- Abfallwirtschaft
- Schutz und Sanierung von Boden, Grund- und Oberflächenwasser
- Lärm- und Erschütterungsschutz
- Arten- und Landschaftsschutz
- Strahlenschutz
- Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Umweltschutzes
- Sonstige Umweltschutz-aktivitäten

Die Berechnung der Umweltschutzausgaben ist eine Synthesestatistik, deren Ausgangsdaten aus der VGR und weiteren Publikationen zu den öffentlichen Finanzen und dem EU-Haushalt stammen. Unter anderem werden Daten aus den folgenden Quellen verwendet (StBA 2024b):

- Investitionen für den Umweltschutz im Produzierenden Gewerbe,
- Laufende Ausgaben für Umweltschutz im Produzierenden Gewerbe,
- Kostenstrukturerhebung bei Unternehmen der Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen.

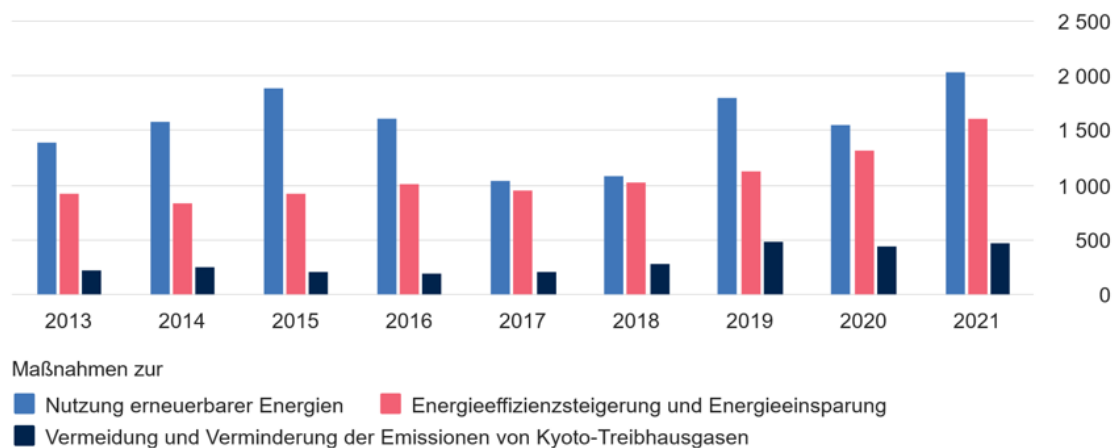
Gemäß den im Jahr 2024 veröffentlichten Daten der UGR wurden in den Jahren 2018 bis 2021 bei ansteigender Tendenz jährlich Ausgaben für Umweltschutz in der Höhe von 74 bis 83 Mrd. Euro getätigt.¹⁷ Davon waren rund 15-16 Mrd. Euro Investitionen, der Rest beläuft sich auf laufende Ausgaben. Die erfassten Investitionen für Umweltschutz

¹⁶ Zugriff am 12.6.2024, Version vom 20.3.2024

¹⁷ Quelle: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/umweltschutzausgaben/Tabellen/ausgaben-umweltschutz.html>

werden mehrheitlich den Unternehmen zugerechnet (10-11,5 Mrd. Euro/Jahr), der Rest dem Staat; Investitionen in Umweltschutz durch Privathaushalte werden keine ausgewiesen (respektive diese werden nicht erfasst). Die Umweltschutzausgaben entfallen mehrheitlich auf die Umweltbereiche Abwasser und Abfall. Dem Umweltbereich Luftreinhaltung und Klimaschutz werden im Zeitraum 2018-2021 jährliche Ausgaben von 8-9,5 Mrd. Euro zugerechnet. Die Investitionen in Klimaschutz werden auf jährlich rund 3-4 Mrd. Euro geschätzt (Abbildung 16).

Abbildung 16: Investitionen in Maßnahmen für den Klimaschutz, in Mio. Euro



Quelle: Statistisches Bundesamt (StBA 2024b)

Einordnung der Klimaschutz-Investitionen

Die Klimaschutzinvestitionen im Produzierenden Gewerbe beliefen sich in den Jahren 2019 und 2020 gemäß den UGR des Statistischen Bundesamts auf jeweils rund 3,5 Mrd. Euro.¹⁸ Dies deckt sich näherungsweise mit den eigenen Abschätzungen zu den Klimaschutzinvestitionen im Industriesektor, welche für die Jahre 2019 und 2020 Klimaschutzinvestitionen in der Höhe von rund 2,5 Mrd. Euro ergeben.

Die Klimaschutzinvestitionen der Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr und Gebäude sowie in die Energieinfrastruktur (u.a. Netze) sind in den UGR nicht enthalten. Dies dürfte auf die in den UGR gewählte Methodik zurückzuführen sein (Rückgriff auf VGR, Fokus auf das produzierende Gewerbe (Industrie)). Dadurch ergibt sich mit Ausnahme des Industriesektors keine Vergleichbarkeit zwischen den UGR und den eigenen Abschätzungen zu den Klimaschutzinvestitionen.

Alternative Angaben zu Klimaschutzinvestitionen finden sich in zwei Publikationen des BMWK:

- Angaben zu Investitionen in erneuerbare Energien-Anlagen werden in der Publikation **Erneuerbare Energien in Zahlen** ausgewiesen, welche jährlich vom BMWK veröffentlicht wird (BMWK 2023b). Diese Angaben werden jeweils vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) berechnet. Im

¹⁸ Quelle: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/09/PD22_405_32.html

Mittel der Jahre 2015-2022 wurden gemäß der Publikation rund 15 Mrd. Euro für die Errichtung erneuerbarer Energie-Anlagen ausgegeben, davon rund 10,7 Mrd.₂₀₂₀ Euro für Anlagen zur Erzeugung von Strom. Dies deckt sich sehr gut mit den eigenen Abschätzungen, welche für die gleichen Anlagen-Kategorien für diesen Zeitraum Investitionen von 10,2 Mrd. Euro₂₀₂₀ ergeben. Die Investitionen in Wärmepumpen (in der Publikation unter Geothermie, Umweltwärme) deckt sich ebenfalls gut mit den eigenen Abschätzungen. Die eigene Abschätzung und die BMWK-Publikation weisen für dieses einen Anstieg von rund 1-1,5 Mrd. Euro₂₀₂₀ im Jahr 2015 auf 4-5 Mrd. Euro im Jahr 2022₂₀₂₀ aus.

- In der Publikation Energieeffizienz in Zahlen, welche ebenfalls durch das BMWK veröffentlicht wird (BMWK 2023a), werden Investitionen zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebestand ausgewiesen. Diese Werte werden durch das DIW abgeschätzt. In den Jahren 2015 bis 2019 belaufen sich die ausgewiesenen Investitionen auf 38 bis 46 Mrd. Euro jährlich. Darin enthalten sind Investitionen für Maßnahmen zur Wärmedämmung (an Dach, Fassade, Fenster, etc.), sowie die Erneuerung von Heizungen im Wohnungs- sowie im Nichtwohnungsbau. Dieser Umfang deckt sich gut mit den hier berechneten Gesamtinvestitionen für die Bereiche energetische Sanierungen und Wärmeerzeuger in den Sektoren Private Haushalte und GHD, welche sich in diesem Zeitraum auf rund 43 Mrd. Euro₂₀₂₀/Jahr belaufen. Die abgeschätzten Klimaschutzinvestitionen, d. h. die Gesamtinvestitionen abzüglich der Ohnehin-Investitionen, liegen bei rund 15 Mrd. Euro₂₀₂₀.

In der gleichen Studie werden auch Angaben zu Investitionen zur Steigerung der Energieeffizienz im Produzierenden Gewerbe publiziert. Diese Investitionen werden auf rund 1 Mrd. Euro₂₀₂₀/Jahr eingeschätzt. Auch bei diesem Betreffnis zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der eigenen Abschätzung (Klimaschutzinvestitionen im Bereich Energieeffizienzverbesserung im Sektor Industrie – Mittelwertwerte der Jahre 2015-2020: 1,1 Mrd. Euro₂₀₂₀).

Fazit des Quellenvergleichs: Ein Vergleich der eigenen Abschätzungen zu Klimaschutzinvestitionen mit anderen Quellen ist aufgrund der jeweils unterschiedlich gewählten Abgrenzungen und Definitionen nur bedingt möglich. Wo ein Vergleich möglich ist zeigt sich erwartungsgemäß keine exakte, in der Größenordnungen und Tendenz jedoch eine gute Übereinstimmung.

2.2 Bisherige Ausgaben für Klimaanpassung und vereinfachte Abschätzung zukünftiger Ausgaben zur Anpassung an Extremwetterereignisse

Die Debatte um Politikinstrumente zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels ist jünger als die Debatte um Klimaschutzinstrumente. Als solches bestehen noch zahlreiche Herausforderungen im Bereich der Klimafolgenanpassung, die eine effektive Politikgestaltung und folglich auch die Abschätzung der Kosten bzw. Investitionsnotwendigkeiten für eine ‚erfolgreiche‘ Anpassung erschweren. Der erste Teil des nachfolgenden Kapitels (Kapitel 2.2.1) gibt einen Überblick über diese Herausforderungen, während im zweiten Teil (Kapitel 2.2.2) die Methodik zur Ermittlung vergangener, sowie zukünftig

notwendiger Investitionen in die Anpassung an Klimawandelfolgen vorgestellt wird, wobei die zukünftig notwendigen Investitionen sich auf die Anpassung an Extremwetterereignisse beziehen. Im dritten und letzten Teil (Kapitel 2.2.3) werden die Ergebnisse der ermittelten Investitionen dargestellt. Die vergangenen Investitionen werden für ein Referenzszenario ausgewiesen und vereinfachte Annahmen für jährliche Veränderungsimpulse über den aktuellen Politikstand hinaus zur Abbildung eines Szenarios der zukünftigen Anpassung an die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und ein Szenario der notwendigen Anpassung an ein verstärktes Extremwetterszenario getroffen.

2.2.1 Herausforderungen in der Ermittlung von Anpassungsinvestitionen

Es ist derzeit sowohl auf regionaler, wie auch Bundes- und globaler Ebene noch unklar bzw. nicht quantifiziert, was ‚erfolgreiche‘ Klimaanpassung konstituiert. In Artikel 7 des Pariser Klimaabkommens wird lediglich die „Verbesserung der Anpassungsfähigkeit, die Stärkung der Widerstandsfähigkeit und die Verringerung der Anfälligkeit gegenüber Klimaänderungen, um einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung zu leisten und eine angemessene Reaktion auf dem Gebiet der Anpassung zu gewährleisten“ als globales qualitatives Ziel benannt (Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union 2016). Für eine Abschätzung der Investitionsnotwendigkeiten sind jedoch quantifizierbare Ziele unerlässlich. Das nationale Klimaanpassungsgesetz, welches am 1.7.2024 in Kraft getreten ist, benennt selbst keine eigenen Ziele, sondern verweist in §3 lediglich auf eine bis September 2025 vorzulegende Klimaanpassungsstrategie, die dann quantifizierbare und messbare Ziele für verschiedene Cluster bzw. Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS-Handlungsfelder) enthalten soll (vgl. BMUV 2023). Diese werden derzeit von der Bundesregierung erarbeitet. Konkrete Ziele sind jedoch noch nicht veröffentlicht. Hier unterscheidet sich die Anpassung vom Klimaschutz, dessen quantifizierbares Ziel der Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs von deutlich unter zwei Grad, bzw. auf nationaler Ebene der Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 klare Erfolgspfade vorgibt, die mit Maßnahmen und folglich Kosten ausgestaltet werden können (vgl. u.a. Agora Energiewende 2021).

Ein weiterer großer Unterschied zum Klimaschutz besteht bei der Klimaanpassung in ihrer Kontextabhängigkeit: Die Kosten, aber auch die Effektivität (und somit die Entscheidung, ob sie in diesem Kontext überhaupt sinnvoll ist) von Anpassungsmaßnahmen ist stark von spezifischen Standorten, Zeiträumen und Betroffenheiten abhängig. Anpassungsmaßnahmen zielen auf die Bewältigung spezifischer Risiken bzw. Auswirkungen des Klimawandels ab. Dieser stellt sich in den Alpen anders dar als an der Nordseeküste und ist darüber hinaus mit Unsicherheiten u.a. in Bezug auf Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit gekennzeichnet. Im Gegensatz hierzu ist im Klimaschutz eine eingesparte Tonne von CO₂-Emissionen als sog. ‚common burden‘ unabhängig vom Ort der Einsparung (vgl. u.a. Watkiss 2022).

Die (geschätzten) Kosten der Anpassung variieren erheblich und hängen davon ab, ob Maßnahmen des allgemeinen Resilienzaufbaus einbezogen werden. Eine Investition in die Errichtung eines neuen Deichs kann der allgemeinen, vom Klimawandel unabhängigen Vermeidung von Schäden dienen, oder aufgrund des Klimawandels notwendig geworden sein. Hier ist allerdings bei der Beurteilung der Anpassungskosten zu

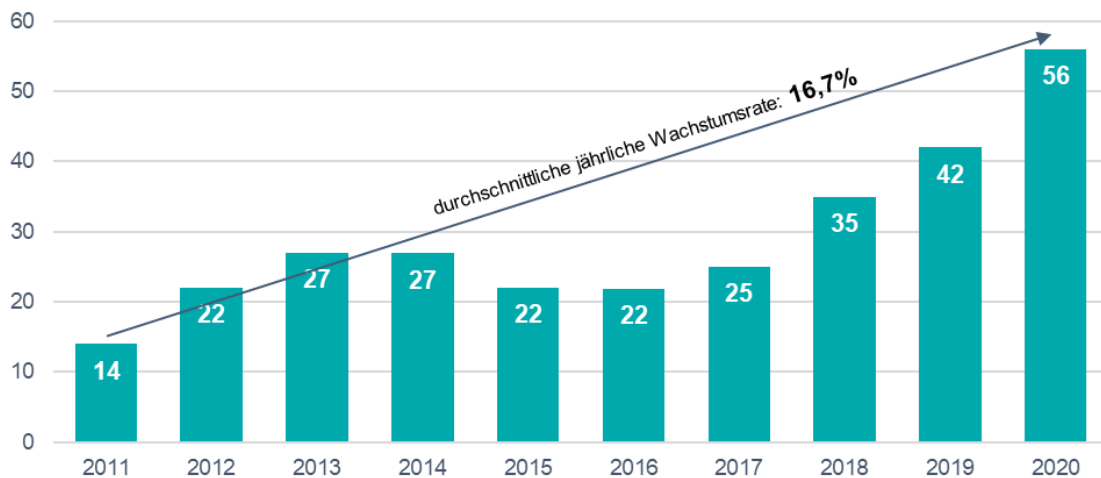
unterscheiden, ob nur der Anteil des Deichs, der aufgrund des Klimawandels im Vergleich zu einem ohne den Klimawandel gebauten Deich, oder die gesamten Kosten als anpassungsrelevant betrachtet werden. Diese Differenzrechnungen sind meist komplex und von weiteren Unsicherheiten gekennzeichnet. Im Kontext des Vorhabens werden die Maßnahmen jeweils in ihrer vollständigen Höhe mit in die Betrachtung einbezogen, da keine abschließende Einschätzung über die Anteilsfindungen möglich war (bspw. bei der Auswertung der Posten des Bundeshaushalts, siehe Kapitel 2.2.2).

Zusätzlich zu den finanziellen Aspekten gibt es zahlreiche Barrieren und Einschränkungen für die Anpassung, einschließlich physischer, ökologischer, technologischer, informationsbezogener und sozialer Faktoren. Diese Faktoren können die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen erschweren und die Kosten erhöhen. In einigen Fällen wird es sogar Grenzen der Anpassung geben, die nicht überschritten werden können. So wäre beispielsweise die Anpassung an den steigenden Meeresspiegel für eine Vielzahl kleiner Inselstaaten mit einer Erhöhung bzw. Aufschüttung des gesamten Staatsgebietes um mehrere Meter verbunden, der mittelfristig mit nicht leistbaren Kosten (und auch aus der rein ökonomischen Perspektive, kulturelle und lebensweltliche Aspekte ausklammernd, mit mehr Kosten als Nutzen verbunden) ist. Ein weiterer Aspekt der Grenzen der Anpassung betrifft Residualschäden, also Schäden des Klimawandels, die trotz einer erfolgreichen, flächendeckenden Anpassung an Klimawandelereignisse auftreten, und die ebenfalls nur schwer zu quantifizieren sind.

Die verschiedenen Herausforderungen und unterschiedlichen Quantifizierungsansätze von Anpassungsinvestitionen sorgen für eine extrem unterschiedliche Einschätzung der Investitionsnotwendigkeiten. So kommt eine Studie im Auftrag der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2017 zum Ergebnis, dass Investitionsnotwendigkeiten in die Klimaanpassung in der EU zwischen 35 und 500 Mrd. € pro Jahr liegen, je nach Annahmen, betrachtetem Zeitraum und Berechnungsmethoden (vgl. Europäische Kommission 2017). Auf globaler Ebene besagt der Adaptation Gap Report 2022 des UN-Umweltprogramms, dass bis 2030 jährlich zwischen 160 und 340 Mrd. USD und zwischen 2030 und 2050 sogar zwischen 315 und 565 Mrd. USD jährlich für eine umfassende Anpassung benötigt werden (vgl. United Nations Environment Programme 2022).

Legt man diese Ex-Ante-Abschätzungen der Investitionsnotwendigkeiten den bisherigen tatsächlich erfolgten Anpassungsinvestitionen entgegen, so zeigt sich eine signifikante Anpassungslücke. Auch wenn in den vergangenen Jahren die insgesamt geflossenen Geldmengen mit ca. 17% pro Jahr anstiegen, so lag die gesamte globale Investitionssumme, basierend auf Daten der Climate Policy Initiative im Jahr 2020 lediglich bei 56 Mrd. USD (siehe Abbildung 17). Es zeigt sich aber auch, dass Investitionen in Klimaanpassung relativ gesehen stärker ansteigen als Investitionen in Klimaschutzprojekte – hier lag das Wachstum über die Dekade 2011 bis 2020 lediglich bei ca. 7% pro Jahr (vgl. CPI 2022).

Abbildung 17: Zeitreihe vergangener globaler Investitionen für Klimafolgenanpassung zwischen 2011 und 2020 in Mrd. USD



Quelle: Eigene Darstellung nach CPI (2022)

2.2.2 Vorgehen zur Ermittlung der Anpassungsinvestitionen

2.2.2.1 Vorgehen zur Ermittlung der vergangenen Anpassungsinvestitionen

Aufgrund der nur in Einzeldaten bruchstückhaft vorliegenden und bisher noch in keiner Untersuchung integriert zusammengeführten Gesamtmenge der in den vergangenen Jahren in Deutschland bereits in die Klimaanpassung investierten bzw. ausgegebenen Gesamtmittel wurde ein umfangreicher Desk-Research-Ansatz auf mehreren Ebenen verfolgt. Dieser hat zum Ziel, auf den verschiedenen Akteursebenen bestehende Finanzflüsse oder Haushaltsposten zu identifizieren, die einen Bezug zu Maßnahmen der Klimafolgenanpassung aufweisen. Die Bottom-up-Recherche erfolgte dabei für insgesamt vier Investitionsarten:

- Ausgaben des Bundes
- Ausgaben der Länder
- Ausgaben auf Ebene von Kreisen und Gemeinden
- Ausgaben privater Akteur:innen

Aufgrund variierender Datengrundlagen wurden jeweils unterschiedliche methodische Vorgehensweisen zur Ermittlung der vergangenen Anpassungsinvestitionen je Akteurs-ebene (Bund, Länder, Kreise & Gemeinden, private Akteur:innen) gewählt. In Abhängigkeit von der Quellenlage sind die Vorgehensweisen zum Teil von vereinfachenden Annahmen geprägt und stellen tendenziell eher die untere belastbar zu ermittelnde Grenze der Ausgaben dar. Insbesondere auf Ebene der Kommunen, sowie bei den privaten Akteur:innen bestehen noch zahlreiche Wissens- und Erfassungslücken, die nur über ein annahmenbasiertes Vorgehen näherungsweise gefüllt werden konnten.

Ausgaben des Bundes

Die vergangenen Ausgaben des Bundes in Maßnahmen und Instrumente, die der Anpassung an die Folgen des Klimawandels dienen, wurde mittels einer automatisierten Auswertung aller Bundeshaushalts-Einzelpläne der jeweiligen Ministerien in den Jahren

2012 bis 2021 durchgeführt. Die Einzelpläne und deren Aufstellung wurden der Website des Bundesministeriums der Finanzen entnommen (vgl. Bundesministerium der Finanzen 2023). In einem ersten Schritt wurde hier, basierend auf einer 35 Begriffe umfassenden Ontologie verschiedener Begrifflichkeiten wie beispielsweise "Klimaanpassung", "Hochwasserschutz", "Grüne Infrastruktur", "Klimawandel", "Dürre" und "Resilienz" eine Schlagwortsuche durchgeführt, um die jeweils relevanten Posten und ihre Gesamtinvestitionshöhe zu ermitteln. Es konnten in den Einzelplänen der Jahre 2012 bis 2021 insgesamt 939 Einzelposten mit einem Bezug zu Klimaanpassung identifiziert werden.

In einem zweiten Schritt wurden diese Einzelposten auf einen tatsächlich vorliegenden Klimaanpassungsbezug hin überprüft, um eine falsche Verschlagwortung und Zuordnung auf die Ziele der Anpassung hin auszuschließen. Vereinzelt wurden auch haushalterisch als negative Ausgaben verbuchte Posten (bspw. Globale Minderausgaben) identifiziert, diese wurden jedoch nicht mit den einzelnen investiven Posten verrechnet, sondern ebenfalls aus der weiteren Betrachtung entfernt.

Da Klimaanpassung eine Querschnittsaufgabe darstellt, und die identifizierten Einzelposten zum Teil auch Zuordnungen zu anderen Aufgaben des Staates zulassen, wurde in einem dritten Schritt für jeden Einzelposten eine anpassungsrelevante Teilmenge (die dann die Höhe der anpassungsrelevanten Investitionsmenge bestimmt), basierend auf einem Analyseraster bestimmt:

- Ein geringer Klimaanpassungsbezug lag vor, wenn im Titel oder in der Beschreibung die Anpassung an die Klimawandelfolgen einer der Investitionsgegenstände neben mehreren weiteren Gegenständen oder Zielen war. Abhängig von der Anzahl der weiteren Ziele wurden so anpassungsrelevante Anteile zwischen 10 und 25% festgelegt. Dies war zum Beispiel bei der Förderung der Digitalisierung in der Landwirtschaft der Fall.
- Ein mittlerer Klimaanpassungsbezug lag vor, wenn Klimaanpassung als gleichberechtigtes bzw. gleichgewichtetes Umsetzungsziel neben einem weiteren Ziel genannt war und resultierte in einem anpassungsrelevanten Anteil von 50% - vorkommend beispielsweise bei der Förderung von FuE-Vorhaben im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe und zur Förderung der nationalen Projekte der nachhaltigen Waldwirtschaft.
- War die Verbesserung der Klimaanpassung nicht das alleinige erklärte Ziel des Einzelpostens, besaß aber zu den weiteren Zielen große Synergien (beispielsweise zu beobachten im allgemein gehaltenen Waldumbau), wurde ein hoher Klimaanpassungsbezug attestiert und ein Anteil von 75% angenommen.
- Ein vollständiger Klimaanpassungsbezug und somit auch eine Berücksichtigung der Investitionssumme zu 100% erfolgte, wenn die Klimaanpassung oder die Beseitigung von Klimafolgen bzw. ihren Schäden der primäre und einzige Investitionsgrund war. Dies umfasste bspw. die Förderprogramme zur Klimaanpassung in sozialen Einrichtungen oder die Basisförderung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS).

Sofern eine Zuordnung des Klimaanpassungsbezugs auf Basis des Titels oder der Beschreibung der Einzelposten uneindeutig war, wurde diese durch zusätzliche Literaturrecherchen ergänzt. Dies war bei vereinzelt Posten, wie beispielsweise der

Städtebauförderung der Fall. Nach Abzug der Posten, die keinen Bezug zu Ausgaben für Klimaanpassung vorwiesen, verblieben 307 Einzeldaten, die auf Basis der Anteile zusammengefügt und auf Jahresbasis ausgewertet wurden.

Ausgaben der Länder

Im Gegensatz zum Haushalt des Bundes, der für alle Untersuchungsjahre zwischen 2012 und 2021 online und maschinenlesbar vorliegt, ist dies nicht für die Haushalte aller 16 Bundesländer der Fall. Aufgrund dieses teilweisen Nichtvorliegens der Daten oder einer mangelnden Verschlagwortung der Einzelposten wurde eine systematische Datenanfrage an alle Bundesländer zur Auskunft über die Ausgaben mit Anpassungsbezug gestellt. Mangels Rücklauf konnte aber auch hier nicht auf die Daten aller Bundesländer einheitlich zugegriffen werden.

Das alternative Analyseverfahren stützte sich daher auf eine Desk-Research, die die drei zentrale Aspekte bzw. Verantwortungsbereiche der Länder beinhaltete:

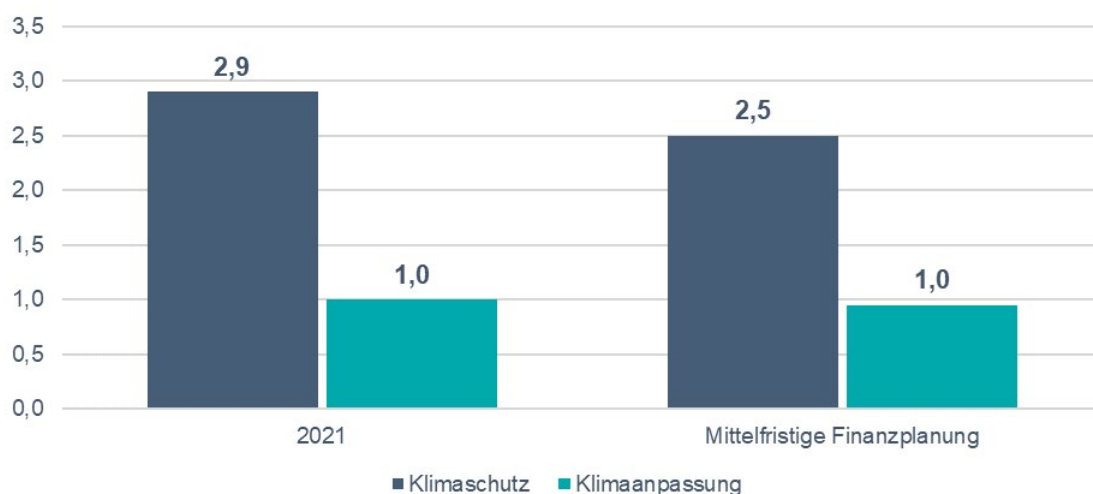
- Mithilfe der Informationsplattform „Anpassung in den Bundesländern“ des Umweltbundesamtes wurden die vorliegenden relevanten Policy-Dokumente, Anpassungsstrategien, Monitoringberichte u. ä. der einzelnen Bundesländer mit Blick auf relevante Einzelinformationen systematisch ausgewertet (vgl. UBA 2023a).
- Auf Basis einer systematischen Literaturrecherche und Aufbereitung der Operationellen Programme der Förderphase 2014-2020 des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), sowie des Europäischen Sozialfonds+ (ESF+) konnten Einzelausgaben identifiziert werden, die sich entweder vollständig oder teilweise dem Ziel der Verbesserung der Klimaanpassung zuordnen ließen. Das oben bei den Ausgaben des Bundes beschriebene Vorgehen zur Ermittlung der jeweils anpassungsrelevanten Anteile fand auch hier Anwendung.
- Auf Basis der bereits auf der übergeordneten Ebene erfolgten Recherche von Bundesfördermitteln konnten für einzelne Bundes- und weitere europäische Förderprogramme, die eine anteilsbasierte Finanzierung auch der Landesebene vorsehen, diese Anteile abgeleitet und in das Gesamtausgabenvolumen eingebracht werden. Dies betrifft beispielsweise jeweils ein Drittel aller anpassungsrelevanten Ausgaben für die Städtebauförderung, da deren Umsetzungsmittel im Regelfall zu je einem Drittel durch Bund, Länder und Kommunen bereitgestellt werden (vgl. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2023).

Ausgaben von Kommunen

Aufgrund der Vielzahl von Kommunen konnte für diese Ebene keine Bottom-up-Recherche auf Grundlage einzelner Anpassungspläne oder der Haushaltsdaten erfolgen. Darüber hinaus ist ohnehin festzustellen, dass auf Ebene von Kommunen kaum systematische Angaben zu Anpassungsausgaben existieren. Neben den kommunalen Anteilen an den Bundesfördermitteln (bspw. der Städtebauförderung, siehe auch oben bei den Ländern) musste daher auf Einzelquellen zurückgegriffen werden, deren Aussagen annahmenbasiert fortgeschrieben wurden.

Für das Jahr 2021 existiert mit dem KfW-Kommunalpanel des Jahres 2022 eine repräsentative Erhebung zu den Strukturen und Handlungsfeldern kommunaler Ausgabestrukturen. So verausgabten Kommunen in 2021 ca. 26,4 Mrd. € für ihre Investitionen, wovon ca. 4% der Klimaanpassung zuzurechnen waren (vgl. Brand & Raffer 2023). Dies entspricht einer Gesamtmenge von etwa 1,06 Mrd. € (siehe Abbildung 18). Der ermittelbaren Menge der kommunalen Investitionsanteile aus den identifizierten Bundesförderprogrammen (für 2021 ca. 200 Mio. €) stehen somit weitere Investitionen in Höhe von 860 Mio. € entgegen, wenn man die Angaben des KfW-Kommunalpanels als valide Gesamtmenge annimmt. Somit resultiert für das Jahr 2021 ein Verhältnis von bekannten bzw. zuordnungsfähigen Investitionen zu den unbekannten bzw. nicht zuordnungsfähigen Investitionen von 1:4,3. Eine anteilige Hochrechnung der Gesamtinvestitionssumme auf Basis dieses Verhältnisses von bekannten zu unbekannten Investitionen wurde jedoch als zu unsicher eingeschätzt. In Ermangelung weiterer Daten für die zukünftigen Jahre wurde daher die im KfW-Kommunalpanel mittelfristig angesetzte Planungssumme für Klimaanpassung von 1 Mrd. € bis zum Jahr 2030 als gegeben angesehen. Für die Jahre 2031 bis 2045 wurde, ausgehend von den angenommenen bzw. abgeleiteten Wachstumsraten der Bundesförderprogramme (bspw. Städtebauförderung) und der jeweils anfallenden kommunalen Eigenanteile an diesen, eine Fortschreibung der Planungssumme vorgenommen.

Abbildung 18: Jährliche geplante Investitionen der Kommunen in Klimaschutz und Klimaanpassung in Mrd. €



Quelle: Eigene Darstellung nach Brand & Raffer (2023). In den Balken „mittelfristige Finanzplanung“ sind die durchschnittlich geplanten Investitionen pro Jahr im Rahmen der mittelfristigen Finanzplanung abgebildet.

Ausgaben privater Akteur:innen

Auch in der Gruppe der privaten Akteur:innen ist über bestehende Einzeldaten hinaus keine systematische Erhebung oder Einordnung möglich, sodass auf eine der Literatur entnommene annahmenbasierte Abschätzung zurückgegriffen werden musste.

Die Annäherung erfolgte hier über die Recherche spezifischer Anstoßeffekte von öffentlichen Mitteln, die wiederum private Investitionen auslösen. Es zeigt sich aus den Evaluierungen der einzelnen Programme, dass das Verhältnis öffentlicher zu privaten Mitteln

ca. 1:1,7 beträgt, d.h. für jeden €, der aus den verschiedenen oben genannten Ausgabewegen durch Förderprogramme, Zuschüsse o.ä. für die Klimafolgenanpassung verausgabt wurde, wurde angenommen, dass er 1,7 € private Investitionen triggert (vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2015).

2.2.2.2 Vorgehen zur vereinfachten Abschätzung der zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Referenzszenario

Das nachfolgend beschriebene Vorgehen zur Ermittlung der zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im **Referenzszenario** nimmt den derzeitigen Politikstand zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels als gegeben an und schreibt diesen fort. Diese Abschätzungen basieren im Wesentlichen auf den Maßnahmenlisten des Aktionsplans Anpassung (APA) III aus dem Jahr 2019, sowie auf Angaben der Bundesländer zu langfristig geplanten Anpassungsstrategien. Hier erfolgt erneut eine Differenzierung nach den vier Ebenen, die bereits für die vergangenen Investitionen betrachtet wurden. Da aktuelle Zahlen der Bundesregierung fehlen und sich auch der Wissensstand um die Kosten des Klimawandels ständig weiterentwickelt, ist es wichtig zu betonen, dass es sich um eine vereinfachte Abschätzung zukünftig notwendiger Anpassungsinvestitionen auf Basis teils veralteter Angaben handelt, die keine Prognose darstellt.

Klimaanpassungsausgaben des Bundes

Auf Bundesebene stellt der Aktionsplan Anpassung (APA) das zentrale Maßnahmenwerk zur Koordination der Aktivitäten zur Anpassung an die Klimawandelfolgen dar. Seit der Erarbeitung der ersten nationalen Anpassungsstrategie im Jahr 2008 wurde der Aktionsplan ca. alle vier Jahre neu aufgestellt bzw. fortgeschrieben (vgl. Bundesregierung 2020), zuletzt im Jahr 2019 mit Version III. Er enthält ca. 150 unterschiedliche Anpassungsmaßnahmen auf Bundesebene mit unterschiedlichen Konkretisierungsstufen, Verantwortlichkeiten, Laufzeiten bzw. Realisationszeiträumen und Finanzierungsbedarfen. Da nicht für jede der Maßnahmen Finanzierungsbedarfe oder Zeiträume benannt wurden, musste eine annahmenbasierte Annäherung an die Kosten der einzelnen Maßnahmen vorgenommen werden. Dafür wird angenommen, dass die APA-Ausgaben in der Höhe wie angekündigt umgesetzt werden. Ist beispielsweise eine Maßnahme als Daueraufgabe gekennzeichnet, so wird ihre Verstetigung zu einer längerfristig etablierten Maßnahme angenommen. Bei anderen Maßnahmen sind ein Zeitraum sowie die Höhe der geplanten Finanzierung angegeben – hier werden die Ausgaben über den Zeitraum anteilig gestreckt. Nicht für jede der Maßnahmen ist jedoch eine Quantifizierung auch sinnvoll bzw. aufgrund von fehlenden Informationen belastbar möglich. Aus diesem Grund wurde in einem ersten Schritt eine Priorisierung der Maßnahmen zur Investitionsableitung vorgenommen: In der Untersuchung auf Operationalisierbarkeit wurde untersucht, ob der APA bereits Angaben zur nötigen Ausgabenhöhe und dem Ausgabenzeitraum macht oder ein Vorgehen zur validen Abschätzung erkennbar ist. In der Untersuchung der Wesentlichkeit wurde anschließend überprüft, ob die Maßnahme einen wesentlichen Teil zur gesamtgesellschaftlichen Anpassung beiträgt oder die (vermuteten) Ausgaben für eine Maßnahme auf gesamtgesellschaftlicher Ebene (langfristig) relevant sind.

Die Beurteilung erfolgte auf einer Skala von 1 bis 4, wobei nur Maßnahmen berücksichtigt wurden, die eine sehr gute oder gute (Bewertung 1 oder 2) Operationalisierbarkeit aufwiesen, und gleichzeitig mindestens über ein mittleres Investitionsniveau (Bewertung 1 oder 2) verfügten und somit einer hohen Wesentlichkeit entsprachen. Eine Ausnahme stellten Maßnahmen mit sehr guter Operationalisierbarkeit dar – hier wurden, auch wenn nur ein geringes Investitionsniveau ableitbar war, Investitionshöhen übernommen (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Matrix der nach Wesentlichkeit und Operationalisierbarkeit eingeschätzten Maßnahmen des APA III

		hohe Wesentlichkeit		geringe Wesentlichkeit	
		1	2	3	4
hohe Operationalisierbarkeit	1	14	3	6	0
	2	16	3	13	0
	3	7	21	20	2
geringe Operationalisierbarkeit	4	2	20	14	2

Quelle: Eigene Bearbeitung auf Basis von Bundesregierung, 2019. In Grün dargestellt sind die Zellen, deren Maßnahmen belastbar annahmen- oder literaturbasiert mit Investitionshöhen hinterlegt werden konnten.

Insgesamt wurden so von den 143 vorliegenden Maßnahmen 42 annahmenbasiert mit notwendigen Kosten versehen. Basierend auf den Maßnahmenbeschreibungen wurden Angaben zu Laufzeiten und Ausgabenhöhe übernommen und annahmenbasiert ergänzt.

Klimaanpassungsausgaben der Länder

Wie auch bei der Ermittlung der Ausgaben der vergangenen Jahre (vgl. Kapitel 2.2.2.1) wurden für die Identifizierung der zukünftigen Klimaanpassungsinvestitionen der Länder in einem ersten Schritt Informationen via Desk-Research über zwei Hauptwege gesammelt: Auf Basis der Informationsplattform „Anpassung in den Bundesländern“ des Umweltbundesamts (UBA) konnten für einzelne Bundesländer aus den jeweiligen Anpassungsstrategien geplante Ausgabensummen entnommen werden (vgl. UBA 2023a). Diese wurden ergänzt um eine systematische Prüfung der Operationellen Programme der EFRE- bzw. ESF-Förderphase 2021-2027. Hier ließen sich im Großteil der Länder eine Vielzahl an Maßnahmen identifizieren, die auf das spezifische Ziel der Verbesserung der Klimaresilienz einzahlen. Aber auch an weiteren Schnittstellen der Klimaanpassung konnten jahresscharf Maßnahmen bzw. eingestellte Mittel identifiziert werden, die die Klimaanpassung als ein Teilziel benannten. Diese wurden entsprechend des oben beschriebenen anteilsbasierten Ansatzes (vgl. Ermittlung der vergangenen Bundesinvestitionen in Kapitel 2.2.2.1) mitaufgenommen. Ergänzt wurden die Informationen der UBA-Plattform sowie der EFRE-Programme durch vereinzelte Medienberichte bzw. Einzeldaten, die bereits publiziert, aber noch nicht in den entsprechenden Strategien vermerkt waren. So kündigte bspw. das Land NRW im Juni 2023 ein Investitionsprogramm für kommunale Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen in Höhe von 300 Mio. € pro Jahr über die nächsten 20 Jahre an (vgl. Landesregierung Nordrhein-Westfalen 2023).

Die so identifizierten Mittel wurden anschließend, analog des Vorgehens bei den vergangenen Investitionen (vgl. Kapitel 2.2.2.1), um einen weiteren Posten in Landesverantwortung ergänzt: Für die auf Bundesebene als Teil des APA identifizierten und fortgeschriebenen Förderprogramme (bspw. im Stadtumbau) wurden entsprechend die gesetzlich von den Ländern anteilig zu erbringenden Eigenmittel in die Berechnung miteinbezogen (vgl. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2023).

Klimaanpassungsausgaben der Kommunen

Die Abschätzung der kommunalen Eigenmittel der Bundes- und Landesfördermittel laut APA III findet auch auf Ebene der Kommunen Anwendung. Hier gilt ebenfalls, dass kaum Einzeldaten oder systematische Erhebungen zur zukünftigen Ausgestaltung von Anpassungsprogrammen vorliegen. Aus diesem Grund musste auf eine anteilige Vorausrechnung auf die Jahre ab 2022 basierend auf dem Verhältnis zwischen den Eigenanteilen der geförderten, sowie der laut KfW-Erhebung zusätzlich notwendigen Maßnahmen aus 2021 zurückgegriffen werden (vgl. Brand & Raffer 2023).

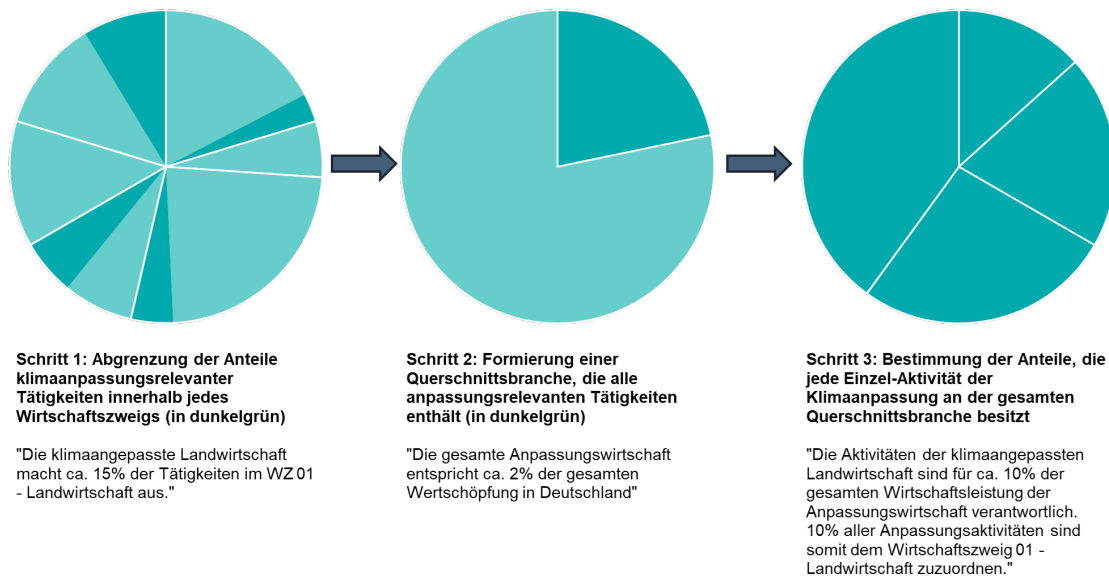
Klimaanpassungsausgaben privater Akteur:innen

Auch für die Ausgaben privater Akteur:innen gilt, dass über in den Medien publizierte Einzeldaten hinaus keine systematische Erhebung möglich ist. Hier wurde deshalb erneut auf eine Annäherung über das Verhältnis von staatlichen Fördermitteln, basierend auf der Fortschreibung des APA III und den durch sie getriggerten privaten Investitionen, (u.a. aus Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2015) zurückgegriffen. Für die Maßnahmen des APA, die nicht direkt in einem Förderprogramm oder anderen Finanzierungsunterstützungen münden, konnten keine Verhältnisse valide abgeleitet werden.

Aufteilung und Zuordnung der Klimaanpassungsausgaben zu Wirtschaftszweigen

Nachdem die Gesamthöhe der Investitionen durch Recherchen und Abschätzungen ermittelt wurde, erfolgt im nächsten Schritt eine Aufteilung der Zeitreihen nach Wirtschaftszweigen. Diese Aufteilung ist insbesondere für die Quantifizierung der zusätzlichen volkswirtschaftlichen Effekte der Klimaanpassung als Bestandteil des Arbeitspakets 3 notwendig, da hierfür das makroökonomische Modell INFORGE/PANTA RHEI der GWS eingesetzt wird, welches Investitionen auf Ebene von insgesamt 63 Wirtschaftszweigen (WZ) detailliert abbildet. Für diese Aufteilung nach Wirtschaftszweigen kommt das *envigos*-Modell („Environmental Goods and Services“) der Prognos AG zum Einsatz. Bei *envigos* handelt es sich um ein statistisches Abgrenzungsmodell, mit welchem die Untersuchung von Querschnittsbranchen (bspw. der Umweltwirtschaft oder der Klimaanpassungswirtschaft als Teilmenge dieser) ermöglicht wird, die in statistischen Datenbanken als solches nicht abgegrenzt bzw. definiert sind. Für sämtliche Wirtschaftszweige kann das Modell basierend auf der Verschneidung von Primärstatistiken und Input-Output-Rechnungen einen Anteil der umweltfreundlichen (bzw. in diesem Fall für die Klimaanpassung relevanten) Dienstleistungen und Güter bestimmen und so Informationen über eine fiktive Querschnittsbranche außerhalb der amtlichen Statistiken generieren. Diese Querschnittsbranche besteht dann wiederum aus einer Vielzahl von Einzelprodukten bzw. Maßnahmen, die verwendet werden können, um den Anteil des Einzelprodukts an der Gesamtaktivität der Branche abzuleiten (siehe Abbildung 19).

Abbildung 19: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ableitung der Verteilung der Klimaanpassungsaktivitäten auf die Wirtschaftszweige



Quelle: Eigene Darstellung

Da *envigos* auf der WZ-Fünfsteller-Ebene operiert, sind mit dem Modell detaillierte Aussagen zum Anteil einzelner Dienstleistungen/ Güter der Anpassung an der Gesamtheit aller Anpassungsaktivitäten möglich, die dann auf die Wirtschaftszweige des INFORGE/PANTA RHEI-Modells umgeschlüsselt werden können. Unter der Annahme, dass die Investitionen der verschiedenen Ebenen sämtliche Bereiche der Anpassungswirtschaft abdecken werden, konnte so eine Aufteilung der Gesamthöhe top-down auf einzelne Wirtschaftszweige erfolgen.

2.2.2.3 Vorgehen zur Ermittlung der zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Anpassungsszenario

Das in Kapitel 2.2.2.2 beschriebene Referenzszenario stellt eine vereinfachte Abschätzung der erwarteten zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse auf Basis des derzeitigen Politikstandes dar. Insgesamt ist jedoch von einem erheblichen zukünftigen Anstieg der klimawandelbedingten Schäden auszugehen (Flaute et al. 2022). Neben den bisher geplanten Maßnahmen sind somit weitere Maßnahmen für eine erfolgreiche Klimaanpassung erforderlich. Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, werden für Deutschland zwar derzeit quantifizierbare Ziele der Klimaanpassung erarbeitet, gleichzeitig sind diese zum Zeitpunkt der Erarbeitung dieser Studie noch nicht öffentlich bekannt. Daher wurde im Anpassungsszenario auf eine vereinfachte Zielformulierung zurückgegriffen, welche auf Basis von Kosten-Nutzen-Analysen die Höhe einzelner Anpassungsinvestitionen ermittelt, die für eine vollständige Reduktion der im Modell inländisch entstehenden erwarteten klimawandelbedingten Schäden aus Extremwetterereignissen notwendig sind. Die dabei angenommene Übertragung einzelner mikroökonomischer Analysen auf die Gesamtwirtschaft ist mangels weitergehender Quantifizierungen notwendig, aber stark vereinfachend.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass im Szenario auch eine vollständige Reduktion der Schäden erfolgt, da im Modell (siehe Kapitel 4) zwischen der Maßnahmenplanung und dem Eintreten der vollständigen Schadensreduktionswirkung ein Timelag besteht, während dem noch Schäden entstehen. Schäden, die zudem durch Preis- oder Importstrukturveränderungen aus dem Ausland entstehen, können nur begrenzt durch Investitionen in Deutschland adressiert werden. Zur Diskussion und Einordnung dieser und der folgenden Annahmen zur Abschätzung der Anpassungsinvestitionen siehe Kapitel 2.2.3.3.

Ausgehend von der jährlich absolut dargestellten Höhe an Schäden wurden die notwendigen Investitionen auf Basis von Kosten-Nutzen-Verhältnissen abgeschätzt (wobei die Kosten die notwendigen Investitionen widerspiegeln und der Nutzen die vermiedenen Schäden). Nachfolgend werden zunächst die zu erwartenden Schadenshöhen und deren Umlegung auf WZ-Klassifikationen anhand von Klimasignalen beschrieben, dann die Bestimmung geeigneter Anpassungsmaßnahmen und ihrer Kosten-Nutzen-Verhältnisse skizziert und schlussendlich die Verschneidung der Kosten-Nutzen-Verhältnisse mit der Schadenshöhe (nach WZ-Klassifikation) zur Bezifferung der zusätzlich notwendigen Investitionen im Anpassungsszenario dargestellt.

Für die Bezifferung der dargestellten Schadenshöhen der modellierten quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen wurde auf die ökonomische Modellierung der Klimawandelszenarien (für Ergebnisse siehe Kapitel 4) zurückgegriffen. Die modellierten ausgewählten Schäden liegen differenziert nach acht Handlungsfeldern in absoluter Höhe für die Jahre 2023 bis 2045 für ein Extremwetterszenario und ein verstärktes Extremwetterszenario vor. Dabei wurde angenommen, dass die Schäden, die bspw. durch Preis- oder Importstrukturveränderungen aus dem Ausland entstehen, nicht durch Investitionen in Klimaanpassungsmaßnahmen in Deutschland adressiert werden können.

Tabelle 6: Zuordnung der Handlungsfelder auf Klimasignale

Handlungsfeld	Klimasignal/e
Landwirtschaft	Hitze und Dürre (100 %)
Fischerei	Hitze und Dürre (100 %)
Wald- und Forstwirtschaft	Hitze und Dürre (100 %)
Gebäude und Infrastruktur	Starkregen und Hochwasser (100 %)
Wasserwirtschaft	Starkregen und Hochwasser (50 %) Niedrigwasser (50 %)
Gesundheit	Hitze und Dürre (100 %)
Binnenschifffahrt	Niedrigwasser (100 %)
Internationaler Handel	Hitze und Dürre (50 %) Starkregen und Hochwasser (50 %)

Quelle: Eigene Zuordnung

Die Schäden aus dem Handlungsfeld „Internationaler Handel“ wurden daher in der zu vermeidenden Schadenssumme nicht weiter betrachtet, d.h. auch keine für die Vermeidung notwendigen Investitionen berechnet. Für eine detailliertere Unterscheidung

wurden die Schäden in den Handlungsfeldern den jeweiligen, dem Schaden zugrundeliegenden Klimasignalen („Hitze und Dürre“, „Starkregen und Hochwasser“ bzw. „Niedrigwasser“) zugeordnet. Entstanden Schäden im Handlungsfeld aus mehr als einer Klimasignalgruppierung, so wurde eine Gleichverteilung des Schadensaufkommens angenommen (siehe Tabelle 6).

Anschließend wurden analog die klimaanpassungsrelevanten Tätigkeiten (nach WZ-Codes) auf Basis der Werte des *envigos*-Modells auf die drei Klimasignalgruppierungen verteilt. Der WZ-Code „Rohrleitungstiefbau, Brunnenbau und Kläranlagenbau“ wurde beispielsweise zu 100 % dem Klimasignal „Starkregen und Hochwasser“ zugeordnet, während der WZ-Code „Erbringung von Dienstleistungen für Forstwirtschaft und Holzeinschlag“ zu 100 % auf „Hitze und Dürre“ entfällt. Betrachtet wurde lediglich der klimaanpassungsrelevante Teil eines WZ-Codes, welcher je Tätigkeit in *envigos* vorliegt. Mithilfe der Zuordnung der Handlungsfelder sowie der klimaanpassungsrelevanten Tätigkeiten auf die Klimasignale konnten die absoluten Schadenswerte schließlich den WZ-Codes zugeordnet werden: Mithilfe von *envigos* konnte anschließend ermittelt werden, welchen Anteil die Aktivitäten eines spezifischen WZ-Codes an allen WZ-Codes, die die Anpassungsleistungen an ein Klimasignal konstituieren, haben. Sind bspw. die Aktivitäten des Markisenbaus (als Anteil des WZ 13.92 - „Herstellung von konfektionierten Textilwaren“) für 5% der Wertschöpfung aller WZ, die zur Anpassung an Hitze und Dürre dienen, verantwortlich, so greift die Annahme, dass der WZ maximal 5% der Gesamtschäden von Hitze und Dürre negieren kann.

In einem weiteren Schritt folgte die Bestimmung von Kosten-Nutzen-Verhältnissen „typischer“ Klimaanpassungsmaßnahmen auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche. Die Kosten-Nutzen-Verhältnisse ermöglichen ausgehend von der Gleichsetzung der zu vermeidenden, erwarteten Schäden mit der Nutzenhöhe die Rückrechnung auf die notwendigen Investitionen, die für die Abdeckung dieser Schäden erforderlich sind.

Eine Herausforderung in der Modellierung liegt in der Unklarheit, in welchem Maße einzelne Extremwetterereignisse überhaupt durch Anpassungsmaßnahmen ausgeglichen werden können. So können zahlreiche Extremwettereffekte zu irreversiblen Schäden oder zu Überschreitung von Kipppunkten führen, die sich auch in Zukunft nicht im ausreichenden Maße adressieren lassen. Da sich diese Komplexität im Rahmen der Modellierung nicht darstellen lässt, beruht die hier vorgenommene Abschätzung auf der **vereinfachten Annahme, dass der Nutzen der implementierten Maßnahmen die erwarteten Schäden vollständig reduzieren kann**. Dies kann mit Blick auf die hier dargestellten quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen zu einer erheblichen Überschätzung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen führen. Als zentrale Quellen der Literaturrecherche mit Fokus auf deutsche Regionen sind u.a. Tröltzsch et al. (2012), Dehnhardt et al. (2008) sowie Dehnhardt et al. (2020) zu nennen. Daneben existieren wenig vergleichbar aufgebaute Studien für Deutschland. Infolge der lückenhaften Datenlage wurden auch Kosten-Nutzen-Verhältnisse aus dem europäischen Kontext betrachtet. Zentrale Quellen sind hier Posthumus et al. (2015) sowie Watkiss et al. (2021). Kosten-Nutzen-Verhältnisse mit regionalem Fokus auf nicht-europäische Regionen wurden aufgrund einer geringen Übertragbarkeit der Zahlen nicht miteinbezogen. Im Ergebnis liegen 73 klimaanpassungsrelevante Kosten-Nutzen-Verhältnisse aus der Literatur

vor. Die Ergebnisse wurden mit der Literaturanalyse zu den Effekten von Anpassungsprozessen an die Folgen des Klimawandels (siehe Kapitel 3.2) verschnitten.

Kosten-Nutzen-Verhältnisse unterliegen Unsicherheiten und können durch eine Vielzahl an Faktoren höher oder niedriger ausfallen. Aufgrund dessen werden in der Literatur die Werte mehrheitlich in Form einer Spannbreite angegeben. Da für die Berechnung der Anpassungsszenarien allerdings die Festlegung auf einen konkreten Wert notwendig ist, entsprechen die finalen Verhältnisse dem Mittelwert des untersten und obersten Werts der jeweiligen ermittelten Spannbreiten. In Tröltzsch et al. (2012) wird darüber hinaus die Höhe der Unsicherheiten je Maßnahme beziffert. Kosten-Nutzen-Verhältnisse mit einer nachweislich „sehr hohen“ Unsicherheit wurden aus der Berechnung des Anpassungsszenarios ausgeschlossen. Dies betraf die vier Kosten-Nutzen-Verhältnisse der Klimaanpassungsmaßnahmen „Schutz von Gebäuden vor Stürmen“, „Wetterinformationssystem Transportwirtschaft“, „Bodenschonende Bewirtschaftungsmethoden“ und „Aufbau und Management von Naturschutzgebieten und deren Vernetzung“.

Neben Informationen zu der Höhe der Unsicherheit beinhalten einige Quellen auch Informationen über die Variation der Kosten-Nutzen-Verhältnisse in unterschiedlichen Klimawandelszenarien. Diese ermöglichen durch die Verrechnung mit den absoluten Schadenshöhen (je Extremwetterszenario) fundierte Aussagen darüber, wie sich die notwendigen Investitionen je Extremwetterszenario unterscheiden. Insgesamt lagen für den gesamten Datensatz acht Kosten-Nutzen-Verhältnisse mit mehr als einer Klimawandelausprägung (bspw. schwacher, mittlerer, starker Klimawandel) vor. Eine Abschätzung der restlichen Kosten-Nutzen-Verhältnisse auf Basis der gegebenen Ausprägungen wurde in Betracht gezogen und geprüft. Eine Übertragbarkeit mittels Verallgemeinerung wurde jedoch aufgrund der Spezifität der Klimaanpassungsmaßnahmen und Inkonsistenzen zwischen den Extremwetterszenarien (teils führte eine Steigerung des Klimawandels zu einer Reduktion der Verhältnisse, teils zu einer Steigerung der Verhältnisse) ausgeschlossen. Im Ergebnis wurde von der Berücksichtigung verschiedener Klimawandelausprägungen bei den Kosten-Nutzen-Verhältnissen abgesehen.

Schließlich wurden die verbleibenden Einzel-Klimaanpassungsmaßnahmen zu 19 „typischen“ Klimaanpassungsmaßnahmen konsolidiert (siehe Tabelle 7). Dafür wurden jeweils ähnliche Klimaanpassungsmaßnahmen aus verschiedenen Studien, wie die Implementierung von Gründächern in Düsseldorf, Bremen oder Helsinki zu einer einzelnen Maßnahme (hier: Gründächer) zusammengefasst. Waren für eine Klimaanpassungsmaßnahme verschiedene Klimawandelszenarien gegeben, wurde jeweils das am stärksten ausgeprägte Szenario für die Berechnung genutzt. Nicht betrachtet wurden die Investitionen in die Dämmung des Gebäudebestands, da diese bereits über die Investitionen in den Klimaschutz mit abgedeckt werden. Zudem wurden Einzelwerte, die massive Ausreißer im Vergleich zu weiteren Kosten-Nutzen-Verhältnissen derselben Maßnahme darstellten, aus den Berechnungen entfernt, insofern die durchschnittliche Mittelabweichung mehr als 80% des Mittelwertes beträgt. Betroffen sind die Maßnahmen „Anpassung von Hitzephasen“ (Änderung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von 1:3,63 auf 1:2,26), „Weitere Erosionsschutzmaßnahmen“ (Änderung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von 1:1,03 auf 1:0,37), „Frühwarnsysteme und Informationsdienste“ (Änderung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von 1:65,46 auf 1:9,33), „Angepasster Einsatz von Pflanzensorten“ (Änderung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von 1:42,22 auf 1:0,33).

Tabelle 7: Überblick über die konsolidierten Kosten-Nutzen-Verhältnisse „typischer“ Klimaanpassungsmaßnahmen

„Typische“ Klimaanpassungsmaßnahmen	Konsolidiertes Kosten-Nutzen-Verhältnis
Angepasste mechanische Bodenbearbeitung	1: 2,27
Angepasster Einsatz von Pflanzensorten	1: 0,33
Anpassung an Hitzephasen	1: 2,26
Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen	1: 0,60
Bodenschonende Agrartechnik	1: 0,53
Bodenschutz durch Matten	1: 1,20
Freiflächenbegrünung	1: 4,16
Frühwarnsysteme und Informationsdienste	1: 9,33
Gründächer	1: 1,26
Hochwasserschutzmaßnahmen	1: 2,50
Klimaangepasste Fischerei	1: 1,50
Klimaangepasste Raumplanung	1: 2,53
Klimaangepasste Strominfrastruktur	1: 0,10
Klimaangepasste Verkehrsinfrastruktur	1: 2,25
Küstenschutz	1: 6,56
Maßnahmen zur Erhöhung der Wassereffizienz	1: 11,00
Niedrigwasserschutzmaßnahmen	1: 4,00
Renaturierung	1: 3,90
Weitere Erosionsschutzmaßnahmen	1: 0,37

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage verschiedener Quellen, u.a. Dehnhardt et al. (2008), Dehnhardt et al. (2020), Tröltzsch et al. (2012), Watkiss et al. (2021). In hellgrauer Schrift sind diejenigen Maßnahmen abgebildet, deren Kosten den Nutzen übersteigt (Kosten-Nutzen-Verhältnis von >1) und die somit als nicht ökonomisch sinnvoll nicht in die weiteren Betrachtungen einfließen.

Mit Blick auf die konsolidierten Kosten-Nutzen-Verhältnisse zeigt sich, dass nicht bei allen Maßnahmen der Nutzen die Kosten übersteigt. Beispielsweise ist bei der „Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen“ der Nutzen kleiner als die Kosten. Im Kontext der Studie wird daher angenommen, dass lediglich betriebswirtschaftlich „sinnvolle“ Verhältnisse, bei denen der Nutzen höher ist als die Kosten, in der Realität auch implementiert werden. Infolgedessen nicht-berücksichtigte Kosten-Nutzen-Verhältnisse sind in Tabelle 7 grau markiert. Die Kosten-Nutzen-Verhältnisse wurden nach der Konsolidierung jeweils für die zutreffenden WZ-Codes (des *envigos*-Modells) vervielfältigt. Dies bedeutet, dass allen Maßnahmen ein oder mehrere korrespondierende Wirtschaftszweige zugewiesen wurden, in dem im Modell später die Bestimmung der Investition wirkt. Beispielsweise wurde das Kosten-Nutzen-Verhältnis „Renaturierung“ von 1:3,9 auf den WZ-Code 81.30.1 entsprechend dem „Garten- und Landschaftsbau“ zugeordnet. Der

resultierende Maßnahmenmix je Wirtschaftszweig beruht dabei zum einen auf einer Bandbreite an Klimaanpassungsmaßnahmen (abgedeckt über die maximal durch eine Maßnahme reduzierbaren Schäden) und zum anderen auf ökonomisch sinnvollen Maßnahmen (abgedeckt über den Ausschluss von Maßnahmen, die ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von größer 1 besitzen).

Anschließend werden die konsolidierten Kosten-Nutzen-Verhältnisse mit der erwarteten Schadensstruktur verschnitten. Basierend auf den vorhergehenden Schritten kann nun eine Aussage darüber getroffen werden, wie hoch die erwarteten klimawandelbedingten Schäden je Tätigkeit (WZ-Code) sind und wie viele Investitionen für eine Einheit an Nutzen notwendig sind. Eine Verrechnung beider Informationen ermöglichte schlussendlich eine Abschätzung der erforderlichen Investitionen für eine Abdeckung der erwarteten Schäden. Die Berechnungen wurden einmal auf Basis der aus dem Modell ermittelten Schadenshöhen im Klimawandelszenario sowie einmal unter den Annahmen eines verstärkten Klimawandelszenarios durchgeführt.

2.2.3 Höhen der Anpassungsinvestitionen

2.2.3.1 Höhe der vergangenen und der vereinfacht abgeschätzten zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Referenzszenario

Auf Basis des in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Vorgehens konnte eine Zeitreihe abgeleitet werden, die die mit dem derzeit geplantem Politikstand verbundenen Investitionen in die Klimafolgenanpassung beschreibt (siehe Abbildung 20). Aufgrund der oben beschriebenen Problematik handelt es sich dabei nicht um eine robuste Prognose der bis 2045 erforderlichen gesamten Anpassungsinvestitionen. Die zukünftigen Anpassungsinvestitionen wurden bis 2050 abgeschätzt, aber nur bis 2045 in der Modellierung in Abschnitt 4 berücksichtigt.

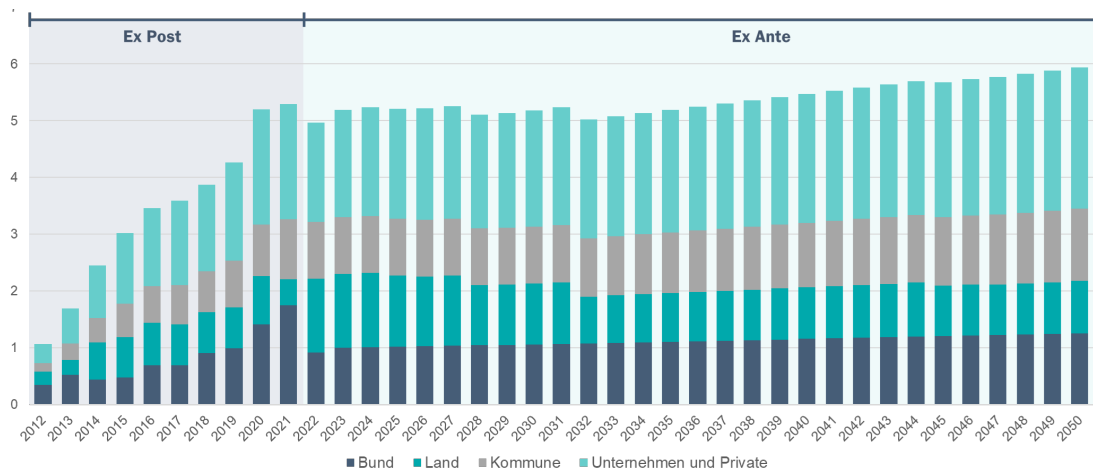
Diese Zeitreihe berücksichtigt dabei noch nicht die in jüngster Vergangenheit angekündigten bzw. konkretisierten Aufwendungen aus weiteren Programmen des Jahres 2023, wie bspw. dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz, der in vielen Bereichen Überschneidungen zu Tätigkeiten der Klimafolgenanpassung aufweist. Darüber hinaus sind Maßnahmen, die bereits mit der Bottom-up-Modellierung der Klimaschutzinvestitionen abgebildet sind, aber auch einen Klimaanpassungsnutzen besitzen (bspw. in der energetischen Sanierung von Gebäuden), nicht in der nachfolgend beschriebenen Zeitreihe vertreten. So sollen bei der Summierung der Gesamtinvestitionen in Klimaschutz und -anpassung mögliche Doppelzählungen vermieden werden.

Wie in Abbildung 20 dargestellt, lassen sich die Klimaanpassungsinvestitionen in zwei Abschnitte unterteilen, die sich aus den unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zusammensetzen: Dem Ex-Post-Abschnitt, beginnend im Jahr 2012, und dem Ex-Ante-Abschnitt, beginnend im Jahr 2022.

Der Ex-Post-Zeitraum ist von einem starken Wachstum der Anpassungsinvestitionen gekennzeichnet: Das Themenfeld Klimaanpassung rückte in der vergangenen Dekade mehr und mehr in den Vordergrund. In 2012 wurden in der Summe aller Akteur:innen ca. 1 Mrd. € investiert, in 2021 waren es bereits 5,4 Mrd. €. Dies entspricht einem

durchschnittlichen jährlichen Wachstum von ca. 21%, was sich in etwa konsistent mit dem globalen Anstieg der Anpassungsinvestitionen zeigt (siehe Kapitel 2.2.1). Während jeder der Posten (Bund, Land, Kommune, private Akteur:innen) im Zeitverlauf zunimmt, entfällt die Hauptlast der Investitionen der öffentlichen Hand mehrheitlich auf den Bund. Auffällig ist zudem ein Einbruch der Landesmittel in 2021. Dieser ist auf die Verschiebungen zwischen den beiden EFRE-Perioden zurückzuführen: 2021 war das erste Jahr der neuen Förderperiode 2021-2027, aber da es aufgrund der Corona-Pandemie neue Herausforderungen in der Gestaltung der Programme sowie Verzögerungen in den Abstimmungen gab, wurden zahlreiche Operationelle Programme (in denen die Schwerpunkte der landeseigenen EFRE-Förderstrategien der neuen Förderperiode abgesteckt werden) erst im Laufe des Jahres fertiggestellt, sodass nur wenige Mittel für 2021 abgerufen werden konnten.

Abbildung 20: Vereinfachte Abschätzung der jährlichen Investitionen in Anpassung nach Akteuren im Referenzszenario in Mrd. €



Quelle: Eigene Darstellung

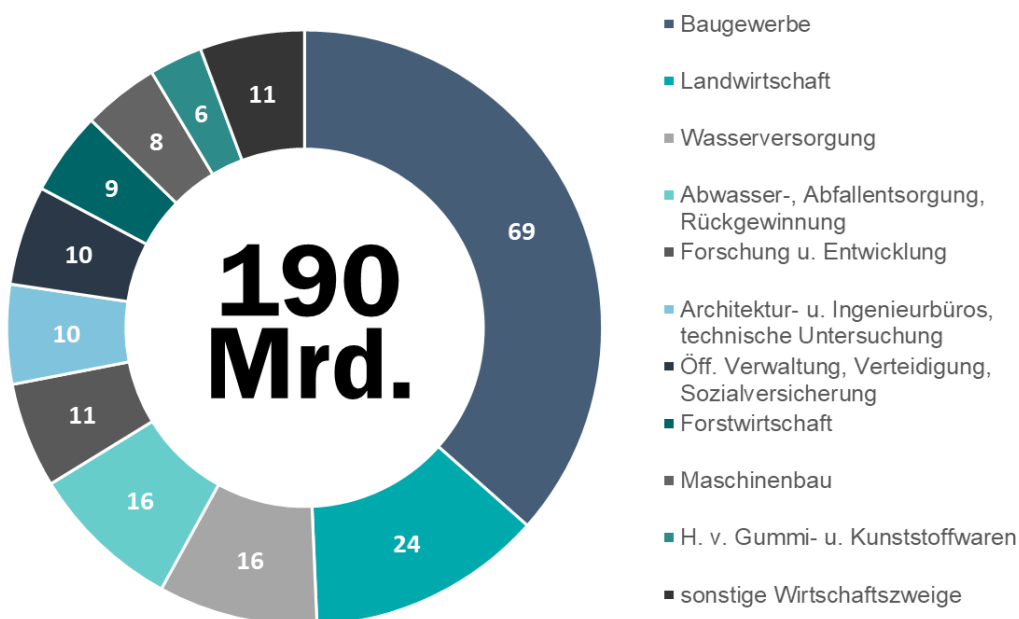
In der Betrachtung des Ex-Ante-Zeitraums flacht die Kurve der Klimaanpassungsinvestitionen dagegen deutlich ab. 2022 wurden ca. 5 Mrd. € in die Anpassung investiert, bis 2050 wächst diese Zahl auf ca. 6 Mrd. € an. Dieser Verlauf stellt den Stand der derzeitigen Planungen laut Politikstand dar. Da allerdings noch keine quantitativen Ziele der Anpassung in den Politiken verankert sind, kann auch kein Zielpfad unter Maßgabe einer garantierten Erreichung des Ziels modelliert werden. Stattdessen wurde hier auf eine langfristige Fortschreibung des aktuellen Politikstands, wo er belastbar quantifiziert werden konnte, zurückgegriffen: Im APA III als Daueraufgaben gekennzeichnete Maßnahmen wurden (da der APA auch keine Aussagen über einzustellende Maßnahmenbudgets bzw. deren Entwicklung macht) mit gleichem Budget bis 2050 als fortgesetzt angenommen. Wurde ein explizites Ziel- bzw. Endjahr im APA genannt, so wurde dieses ebenfalls als gesetzt angesehen und die Investitionen in die Maßnahme ab dem Folgejahr auf 0 gesetzt. Da viele derzeit laufende Förderankündigungen und Programme (beispielsweise die EFRE-Programme auf Landesebene) zu einem bestimmten Zeitpunkt auslaufen und keine Aussagen über Neuauflagen bzw. Veränderungen in der Prioritätensetzung der neuen oder sie fortsetzenden Programme getroffen werden konnten, reduziert sich in einzelnen Posten sogar die Summe der in Klimaanpassung investierten

Mittel. Für einzelne Posten konnte allerdings aufgrund der langen Historie (bspw. in der Städtebauförderung) ein statistischer Wachstumspfad abgeleitet und angewendet werden, für den Großteil der (zumeist sehr jungen) Förderprogramme war dies nicht belastbar möglich.

Addiert man alle Investitionen in die Klimaanpassung von 2012 bis 2050 auf, so ergibt sich im Referenzszenario ein Investitionswert von ca. 190 Mrd. €. Unter alleiniger Betrachtung des Ex-Ante-Zeitraums ab 2022 beläuft sich das hier dargestellte Investitionsvolumen auf ca. 156 Mrd. €. Im Schnitt entstehen so auf Basis des aktuellen Politikstands in den nächsten 23 Jahren jährliche Investitionen in die Klimaanpassung in Höhe von 5,4 Mrd. €. Wie bereits beschrieben stellt dies keine robuste Prognose der tatsächlich bis 2050 erforderlichen Anpassungsinvestitionen dar.

Die Betrachtung nach Branchen, in deren Güter und Dienstleistungen im Zuge einer Investition in Klimaanpassung investiert wird, zeigt eine dominierende Rolle des Bauwesens: In dieses fließen über ein Drittel der auf Basis der Recherchen identifizierten Investitionen (ca. 69 Mrd. € bis 2050, siehe Abbildung 21). Eine wichtige Rolle in der Klimaanpassung spielen auch die Branche der Landwirtschaft (mit Investitionen von 24 Mrd. €), sowie die Branche der Wasserver- und Abwasserentsorgung bzw. Wasserrückgewinnung mit je ca. 16 Mrd. € an Investitionen. Für eine Transformation zu gesellschaftlicher Resilienz sind neben der Umsetzung und Ausführung von Maßnahmen auch Planung und Konzeption der Klimaanpassungsmaßnahmen notwendig. Diese Rolle zeigt sich in den jeweils ca. 10 Mrd. € Investitionen, die im Referenzszenario in die Branche der Architektur- und Ingenieursleistungen, sowie die öffentliche Verwaltung getätigt werden.

Abbildung 21: Vereinfachte Abschätzung der Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse im Referenzszenario nach Branchen von 2012 bis 2050 in Mrd. €

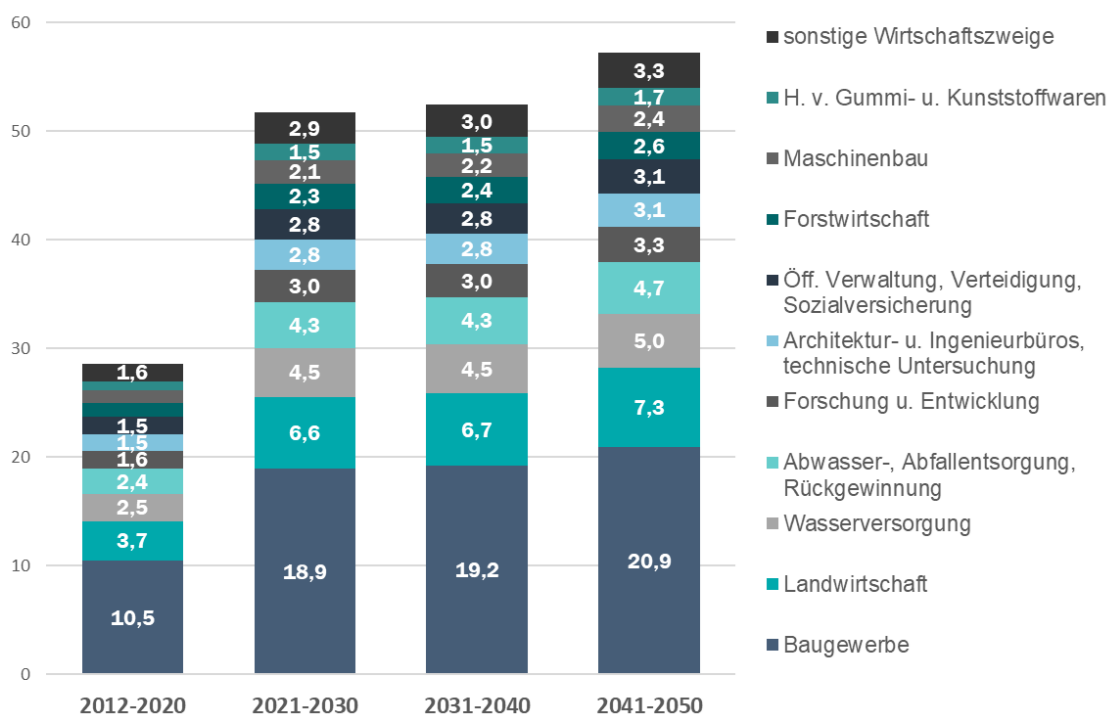


Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, basierend auf dem envigos-Modell der Prognos AG

Die Aufteilung der branchenbezogenen Investitionswerte nach Dekaden zeigt Abbildung 22. Zwischen 2021 und 2030 wird es im Referenzszenario im Vergleich zur Vordekade fast zu einer Verdopplung der Investitionssummen (von ca. 29 Mrd. € auf 52 Mrd. €) kommen, während in den Folgedekaden eine Stagnation bzw. nur noch ein geringer Anstieg der Investitionen zu verzeichnen ist. Insgesamt zeigt sich im Ausblick ein Investitionsniveau in der Bauwirtschaft von ca. 19 Mrd. € pro Dekade (ca. 1,9 Mrd. € pro Jahr), während alle weiteren Branchen im Schnitt zwischen 1,5 und 7 Mrd. € zusätzliche Investitionen pro Dekade durch die Klimafolgenanpassung verzeichnen.

Es zeigt sich, dass das Referenzszenario insbesondere in der Vorausschau nur eine Minimalversion der anzugehenden Klimafolgenanpassung und ihrer Investitionen darstellt. Der aus den Ex-Post-Betrachtungen sichtbare Anstieg der Investitionen in die Klimafolgenanpassung lässt sich aus dem derzeitigen Politikstand nicht in dieser Form fort-schreiben, sondern führt eher zu einer Stagnation der auszugebenden Mittel.

Abbildung 22: Vereinfachte Abschätzung der Investitionen für die Anpassung an Extremwetterereignisse im Referenzszenario nach Branchen und Dekaden in Mrd. €



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, basierend auf dem envigos-Modell der Prognos AG

Da davon auszugehen ist, dass der Klimawandel bis Mitte des Jahrhunderts weiter voranschreiten und noch massivere Auswirkungen auf die Gesellschaft haben wird, ist auch mit einem Anstieg von Schäden und Kosten der Klimawandelfolgen zu rechnen. Durch einen Anstieg der vorbeugenden Investitionen in die Anpassung könnten die Schäden teilweise begrenzt werden – es wird aber deutlich, dass unter den Rahmenbedingungen des Referenzszenarios als Beschreibung des Ist-Zustandes der Politikgestaltung eine signifikante Lücke in der Anpassung an die Klimawandelfolgen verbleiben

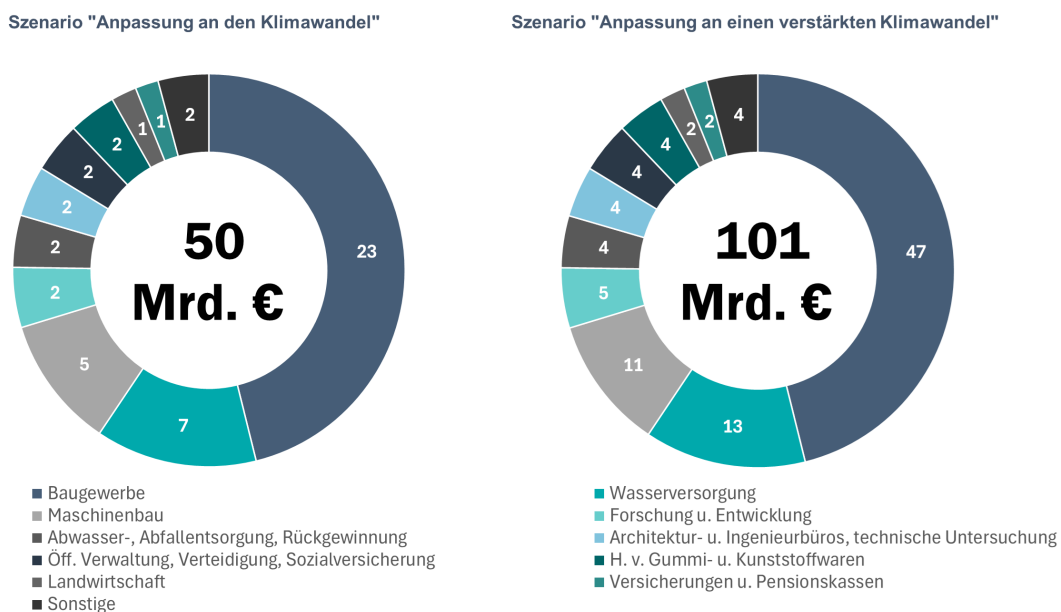
würde, und dass weitere, zusätzliche Politiken und Investitionen ökonomisch sinnvoll sind.

2.2.3.2 Vereinfachte Abschätzung der zukünftigen Anpassungsinvestitionen an Extremwetterereignisse im Anpassungsszenario

Die zukünftig notwendigen zusätzlichen Investitionen in die Anpassung an Extremwetterereignisse in Deutschland unterscheiden sich je nach Ausprägung des zugrundeliegenden Klimawandels: Bei fortschreitendem Klimawandel werden die Auswirkungen auf wirtschaftliche und sozio-ökonomische Größen auf Basis der modellierten, zukünftig zu erwartenden Klimawandeleffekte und -schäden abgeleitet. Im Vergleich dazu wird im verstärkten Extremwetterszenario eine Verdopplung der gesetzten Parameter zugrunde gelegt (vgl. Kapitel 4.2). Die zusätzlich notwendigen Investitionen beziehen sich dabei in diesem Kapitel jeweils auf die zusätzlich anfallenden (Differenz-)Investitionen im Vergleich zum Referenzszenario.

Die vereinfacht abgeschätzten zusätzlich notwendigen Investitionen in die Anpassung an verstärkte Extremwetterereignisse sind mit ca. 100 Mrd. € in etwa doppelt so hoch wie die Anpassung an Extremwetterereignisse bei einem fortschreitenden Klimawandel mit 50 Mrd. € (Abbildung 23). Die zugrundeliegende Annahme einer verdoppelten Wirkung des Klimawandels zwischen den beiden Szenarien zeigt sich nicht nur in der Gesamtmenge, sondern auch den einzelnen Branchen. Im Referenzszenario fallen Investitionen von ca. 190 Mrd. € in die Maßnahmen zur Klimaanpassung als Folge der modellierten Schäden an (siehe Kapitel 2.2.3.1). Addiert man zu diesem Referenzpfad die zusätzlichen Investitionen, so zeigt sich ein Gesamtinvestitionsbedarf von ca. 240 Mrd. € im fortschreitenden Extremwetterszenario bis 2050, und ein Investitionsbedarf von ca. 290 Mrd. € im Szenario eines sich verstärkenden Extremwetterszenarios.

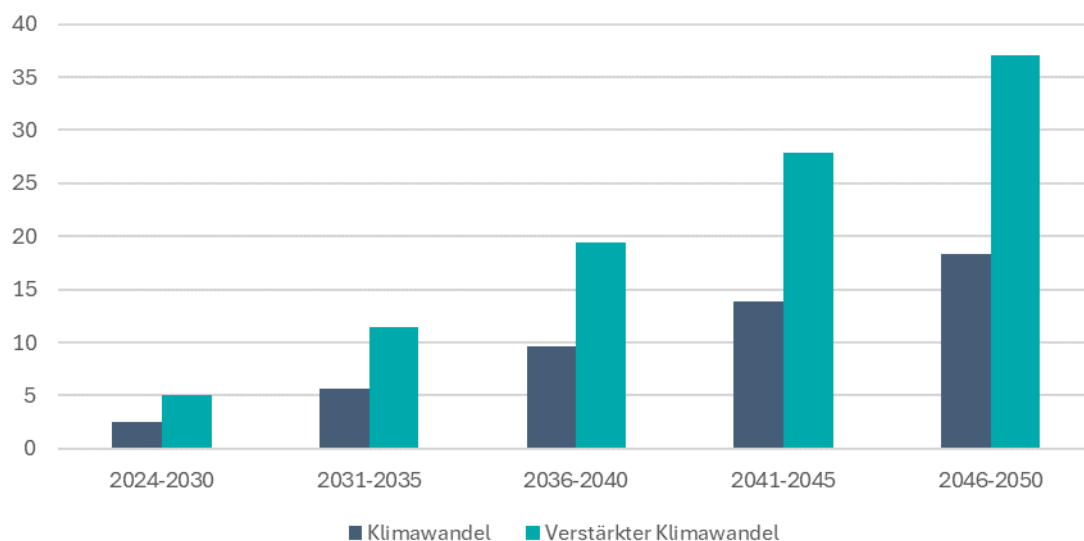
Abbildung 23: Gegenüberstellung der in beiden Anpassungsszenarien vereinfacht abgeschätzten zusätzlichen Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse nach Branchen von 2024 bis 2050 in Mrd. €



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, basierend auf dem envigos-Modell der Prognos AG

Fast die Hälfte aller zusätzlichen Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse entsteht im Baugewerbe (siehe Abbildung 23). Bei einem fortschreitenden Klimawandel belaufen sich die Investitionen in der Branche auf 23 Mrd. € und bei einem verstärkten Klimawandel auf 47 Mrd. €. Neben dem Baugewerbe sind insbesondere auch Investitionen in die Wasserversorgung, sowie den allgemeinen Maschinenbau notwendig. Diese betragen bei fortschreitendem Klimawandel ca. 7 bzw. 5 Mrd. € und bei einem verstärkten Klimawandel 13 bzw. 11 Mrd. €. Auch Abwasserentsorgung spielt in der Klimaanpassung eine wichtige Rolle, ebenso Forschungs- und Entwicklungsleistungen, die Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren sowie die Planung von Anpassungsmaßnahmen. Letztere sind hier dargestellt durch Architektur- und Ingenieurleistungen sowie die öffentliche Verwaltung. Die zusätzlich notwendigen Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse in diesen fünf Branchen belaufen sich in etwa auf dieselbe Höhe – bei einem fortschreitenden Klimawandel auf jeweils ca. 2 Mrd. € und bei einem verstärkten Klimawandel auf jeweils ca. 4-5 Mrd. €. Mit jeweils zusätzlich notwendigen Investitionen von 1 Mrd. € bei fortschreitendem Klimawandel bzw. von 2 Mrd. € im verstärkten Klimawandel sind auch die Landwirtschaft sowie Versicherungsbranche nicht zu vernachlässigen.

Abbildung 24: Vereinfacht abgeschätzte zusätzliche Investitionen zur Anpassung an Extremwetterereignisse in den Anpassungsszenarien zwischen 2024 und 2050 in 5-Jahres-Schritten in Mrd. €



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, basierend auf dem envigos-Modell der Prognos AG

Eine Fortschreibung der aktuell angelegten Maßnahmen zur Anpassung bedeutet einen zusätzlichen Investitionsbedarf im Zeitverlauf (siehe Abbildung 24). Dies ist sowohl bei fortschreitendem Klimawandel wie auch bei verstärktem Klimawandel der Fall. Bis zum Jahr 2040 ist ausgehend von 2024 alle 5 Jahre circa eine Verdoppelung der zusätzlichen Investitionen in die Anpassung an Extremwetterereignisse notwendig. Dies entspricht bis 2040 zusätzlichen notwendigen Investitionen von ca. 18 Mrd. € bei einem fortschreitenden Klimawandel und ca. 36 Mrd. € bei einem verstärkten Klimawandel. Zwischen dem Jahr 2040 und 2050 ist wiederum fast eine Verdopplung der zusätzlichen Investitionen notwendig. Insgesamt sind zwischen 2040 und 2050 zusätzliche Investitionen von

ca. 32 Mrd. € bei einem fortschreitenden Extremwetterszenario und ca. 65 Mrd. € bei einem verstärkten Extremwetterszenario notwendig. Es ist auch über 2050 hinaus mit einem Anstieg der zusätzlich notwendigen Investitionen in Anpassung zu rechnen, da der Klimawandel aufgrund der Trägheit des Klimasystems auch noch nach 2050 und bis mindestens Ende des Jahrhunderts zusätzliche Auswirkungen haben wird.

2.2.3.3 Einordnung und Diskussion der Ergebnisse

Da den in diesem Kapitel vorgestellten Zahlen kein Bottom-Up-Modell zugrunde liegt, wie es bei den Investitionen und Ausgaben für den Klimaschutz der Fall ist, sind die Zahlen eher als einfache Abschätzungen zu verstehen. Insbesondere aus ökonomischer Perspektive sind die Wirkungskanäle der Anpassung noch nicht so sehr erforscht wie im Klimaschutz. Die vorgestellten Zahlen stellen nur Teilmengen der tatsächlich benötigten Investitionen dar und sind eher als untere Grenze der Investitionen zu verstehen.

Darüber hinaus gibt es derzeit noch kein national quantifizierbares Ziel der Anpassung, auf das hin ein Erreichungspfad im Kontext eines Modells hätte konstruiert werden können. Die Ableitung eines quantifizierbaren Schadensreduktionsziels ist Gegenstand der derzeitig erfolgenden Neuaufstellung der Deutschen Anpassungsstrategie. Auch das stellt sich im Klimaschutz anders dar – hier gibt es mit der Verpflichtung zur Treibhausgasneutralität bis 2045 eine konkrete Zielvorstellung.

Aufgrund dieser Limitationen musste daher ein anderweitiges Vorgehen gewählt werden, das sich ausgehend von einem (statistisch zu erwartenden Schaden) über Kosten-Nutzen-Verhältnisse den notwendigen Investitionen annähert.

Obgleich diese Kosten-Nutzen-Verhältnisse die Zielabschätzung ohne allgemein gültige quantitative Klimaanpassungsziele im Anpassungsszenario ermöglichen, ist ihre Nutzung mit Einschränkungen verbunden:

- Die **Aussagekraft von Kosten-Nutzen-Verhältnissen einer Klimaanpassungsmaßnahme kann stark variieren** und ist teils mit **hohen Unsicherheiten verbunden**. Im Unterschied zum Klimaschutz ist die Anpassung an Extremwetterereignisse stark von spezifischen Standorten, Zeiträumen und Betroffenheiten abhängig (siehe auch Kapitel 2.2.1).
- Kosten-Nutzen-Verhältnisse können sich in Abhängigkeit von der Höhe der Investition und im Zeitablauf verändern: Mit einer steigenden Anzahl an Klimaanpassungsmaßnahmen in einem Sektor sinkt die Effektivität (bzw. der Nutzen) von neuen Investitionen typischerweise. Von einem linearen Verlauf zwischen Kosten-Nutzen-Verhältnis und Anzahl an implementierten Maßnahmen ist somit in der Regel nicht auszugehen. Aufgrund fehlender Daten wurden in der Berechnung des Anpassungsszenarios allerdings die Kosten-Nutzen-Verhältnisse dennoch als konstant angenommen. **Daher konnte im Modell auch eine vollständige Reduktion der Schäden (ausgenommen der Schäden, die im Handlungsfeld „Internationaler Handel“ entstehen) erreicht werden. Dies spiegelt jedoch die in der Realität ablaufenden Prozesse nicht wider**, muss aber im Sinne der ‚best available Data‘ hingenommen werden. Im Modell werden jedoch ohnehin **nicht alle inländischen Schäden von Extremwetterereignissen verhindert**, da auch während des Implementationszeitraums von Maßnahmen

(bevor diese ihre volle Wirkung entfalten können) Schäden anfallen werden. Bewusst ausgeklammert wird außerdem der Wirkungskanal, dass vereinzelt auch ausländisch auf die deutsche Volkswirtschaft wirkende Schäden des Klimawandels durch deutsche Investitionen (z.B. durch Maßnahmen der Entwicklungszusammenarbeit) verringert werden könnten.

- **Nicht für alle Anpassungsmaßnahmen lassen sich Kosten-Nutzen-Verhältnisse aus der Literatur ableiten:** Für die klimaangepasste Binnenschifffahrt (WZ-Code 50.4 entsprechend der „Güterbeförderung in der Binnenschifffahrt“) konnten bspw. aufgrund einer fehlenden Datenlage keine Kosten-Nutzen-Verhältnisse abgeleitet werden. Dieser Maßnahme wird somit implizit ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von null zugewiesen. Dies führt in den Ergebnissen dazu, dass bspw. der Binnenschifffahrt keine Investitionen zugeordnet werden können. Obgleich sich die erforderlichen Investitionen laut Modell im Szenario auf null belaufen, sind in der Realität sehr wohl Investitionen zu einer klimaangepassten Gestaltung dieses Sektors notwendig.
- **Die Datengrundlage von Kosten-Nutzen-Verhältnissen von Anpassungsinvestitionen bei verschiedenen Klimawandelszenarien ist lückenhaft:** Wie beschrieben (siehe Kapitel 2.2.1) sind in der Literatur wenig Daten über die Variation der Kosten-Nutzen-Verhältnisse nach verschiedenen Klimawandelszenarien gegeben. Diese reichen nicht aus, um begründbare Annahmen für eine Verallgemeinerung zu treffen. Die resultierenden notwendigen Investitionen je Extremwetterereignis basieren somit auf denselben Kosten-Nutzen-Verhältnissen, obwohl hier andere Verhältnisse je Szenario zu erwarten sind. So mindert dieselbe Investition in ein Regenwasserrückhaltebecken in einem starken Klimawandel (mit häufigeren/ stärkeren Ereignissen) mehr Schäden ab als in einem mittleren Klimawandelszenario und besitzt somit eigentlich ein „besseres“ Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Die vergleichsweise geringe Investitionshöhe in Anpassung an Extremwetterereignisse lässt sich mit verschiedenen Faktoren erklären:

1. Die hier abgeschätzten Investitionen beziehen sich nur auf den Anteil der Schäden, die aus dem Modell der GWS (siehe Kapitel 4.3.1) heraus als **inländisch auftretende Schäden** klassifiziert werden können. Ausländisch entstehende und in der Folge „importierte“ Schäden (bspw. durch Veränderungen von Preisstrukturen infolge von Ernteaussfällen oder Überschwemmungen im Globalen Süden) können nur in geringem Maße im Kontext der Entwicklungszusammenarbeit durch Investitionen der deutschen Volkswirtschaft verringert werden. Sowohl im Szenario Extremwetterereignisse als auch dem Szenario ‚Verstärkte Extremwetterereignisse‘ machen diese inländischen Schäden nur in etwa ein Drittel der Gesamtschäden aus.
2. **Investitionen mit Synergieeffekten zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung** (bspw. die energetische Sanierung von Gebäuden, die sowohl den Heizenergieverbrauch senkt als auch im Sommer den thermischen Komfort erhöht), wurden vollständig dem Klimaschutz zugerechnet, weil hier eine genauere Modellierung der Effekte möglich ist.

3. Die Schäden der Extremwetterereignisse (und damit auch die notwendigen Investitionen in die Anpassung) nehmen in den Modellen der GWS derzeit exponentiell zu. Im Gegensatz zur Klimaschutz-Transformation, die im Wesentlichen bis 2045 abgeschlossen sein muss, werden die **Investitionsnotwendigkeiten in Klimaanpassung aber auch nach 2045 noch weiter ansteigen** und in den Folgejahren um ein Vielfaches höher liegen.
4. Die in Kapitel 2.2.3.2I aufgezeigten 50 bzw. 101 Mrd. € an Anpassungsinvestitionen bis 2050 stellen lediglich die **zusätzlichen Investitionen** dar, die sich über den aktuellen Politikstand (APA III, sowie die bestehenden Länderprogramme, siehe Kapitel 2.2.3.1) hinausgehend ergeben, um die Schadenslücke der abgebildeten Extremwetterereignisse zu schließen. Der Referenzpfad aus Kapitel 2.2.3.1 deckt bereits (je nach gewählter Intensität der Anpassung) zwischen 57 und 72% der notwendigen Investitionen ab – im Klimaschutz liegt dieses Verhältnis bei in etwa 66%.

Ebenso ist klarzustellen, dass eine direkte Gegenüberstellung von ermittelten Investitionen für Klimaschutz und der abgebildeten Maßnahmen für Anpassung grundsätzlich nicht möglich ist. Bei der Gegenüberstellung der Investitionen in Klimaschutz und Anpassung an Extremwetterereignisse kann der Eindruck entstehen, dass (im Modell) die Schadensreduktion durch Anpassung mit vermeintlich wenig Mitteleinsatz möglich ist, während der Klimaschutz (zur Erreichung der nationalen Klimaziele) mit erheblich höheren Investitionen verbunden ist, um Schäden zu vermeiden. Die sich hieraus ergebende Schlussfolgerung, dass in einer ‚ökonomisch optimierten‘ Welt sich der gesamte Mitteleinsatz auf Klimafolgenanpassung konzentrieren sollte, ist aus verschiedenen weiteren Gründen nicht zulässig:

Der Großteil der absehbar beim Klimawandel real entstehenden Kosten lässt sich nur durch Klimaschutzmaßnahmen und nicht durch Anpassungsmaßnahmen vermeiden. Dies gilt insbesondere mit Blick auf massive Effekte, die durch das Überschreiten von Klimakipppunkten entstehen, oder die im Zusammenhang mit globalen Verwerfungen wie etwa Migrationsströmen, dem Kollaps von Ökosystemen oder einer starken Reduktion der globalen Einkommen verbunden mit Einbrüchen in globalen Handelsbeziehungen stehen. Klimaschutz und Klimaanpassung können nur dann ihr volles Potenzial entfalten, wenn sie gemeinsam umgesetzt werden: Selbst bei umfassendem Klimaschutz werden durch die Trägheit des Klimasystems und die langfristig wirkenden Veränderungsprozesse global wie auch lokal Schäden auftreten. Und auch bei einer umfassenden Klimafolgenanpassung müssen gleichzeitig Schutzinvestitionen getroffen werden, da das Gesamtsystem durch den weiteren ungebremsten Anstieg der Treibhausgasemissionen ansonsten langfristig in einen Zustand übergehen könnte, in dem (bspw. durch Erreichen multipler Klimakipppunkte) keine Anpassung mehr möglich wäre.

Darüber hinaus basiert die Modellierung der Schäden auf der indikatorenbasierten Quantifizierung von Einzelwirkungen von Extremwetterereignissen. Eine Vielzahl von Wirkungen des Klimawandels, zu denen noch zu wenig Wissen um ihre ökonomische Auswirkung bzw. Abbildbarkeit vorliegt, können nicht abgebildet werden. Zudem existieren zahlreiche Wirkungen des Klimawandels, die nicht oder nur mit erheblichen Unsicherheiten monetarisierbar sind. Dies umfasst beispielsweise Verluste der Artenvielfalt, Verluste von Menschenleben, Veränderungen des Landschaftsbildes oder den Verlust

von kulturellem Erbe. Die modellierten Schäden durch Extremwetterereignisse (und somit auch die auf ihnen basierenden Anpassungsinvestitionen) stellen daher eine Untergrenze der möglichen Auswirkungen des Klimawandels dar.

3 Wirkungskanäle und Interaktionen des Klimawandels, der Gegenmaßnahmen sowie Anpassungs- und Transformationsprozesse

Für eine spätere Abschätzung der Wirkung von Klimaschutz auf das Energiesystem und die wirtschaftliche Entwicklung und von Klimaanpassung auf die wirtschaftliche Entwicklung ist eine Vorstellung über die Folgen des Klimawandels notwendig. Die Wirkungskanäle und Interaktionen des Klimawandels mit der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, den Wertschöpfungsstrukturen und dem Produktionspotenzial sind mannigfaltig und mit unterschiedlichen Risiken und Schadenshöhen verbunden. Im Folgenden werden in Abschnitt 3.1 die Einflüsse des Klimawandels auf zentrale Handlungsfelder genauer beleuchtet und eine Abschätzung über die wahrscheinliche Höhe der Klimawandeleffekte gegeben. In Abschnitt 3.2 folgt eine Einordnung von Klimaanpassungsmaßnahmen, d.h. mit welchen volkswirtschaftlichen Effekten durch den Anpassungsprozess an den Klimawandel zu rechnen ist. Abschnitt 3.3 fasst die Wirkung von Klimaschutzmaßnahmen auf die Volkswirtschaft zusammen. Die Interaktionen zwischen Klimawandel, Anpassung und Klimaschutz werden in Abschnitt 3.4 betrachtet.

3.1 Wirkungskanäle und Interaktionen des Klimawandels mit der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung

Um Deutschland auf die Folgen des Klimawandels vorzubereiten und die Klimarisiken zu verringern, hat die Bundesregierung 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) verabschiedet (Bundesregierung 2008). Die DAS stellt mögliche Klimawandelfolgen und Anpassungsoptionen in 16 verschiedenen Handlungsfeldern vor, die in sechs Clustern zusammengefasst sind (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Cluster und Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie

DAS-Cluster	DAS-Handlungsfelder
Gesundheit	Menschliche Gesundheit
Wasser	Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft; Küsten- und Meereschutz; Fischerei
Land	Boden; Landwirtschaft; Wald- und Forstwirtschaft; Biologische Vielfalt
Infrastruktur	Bauwesen; Energiewirtschaft; Verkehr und Verkehrsinfrastruktur
Wirtschaft	Industrie und Gewerbe; Tourismuswirtschaft; Finanzwirtschaft ¹
Raumplanung und Bevölkerungsschutz	Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung ¹ ; Bevölkerungsschutz ¹

¹ Die drei Handlungsfelder Finanzwirtschaft; Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung und Bevölkerungsschutz gelten auch als Querschnittsfelder und werden teils nicht den Clustern zugeordnet, sondern separat aufgeführt.

Quelle: eigene Darstellung

Die Fortschreibung der DAS erfolgt alle 5 Jahre im Rahmen von **Fortschrittsberichten** (2015 und 2020). Wichtige Bestandteile des Anpassungsprozesses sind das Monitoring, die Klimawirkungs- und Risikoanalyse, der Aktionsplan Anpassung und die Evaluation. Die **Monitoringberichte** geben alle vier Jahre einen Überblick über die beobachteten Folgen des Klimawandels und die Wirkungen der bereits eingeleiteten Anpassungsmaßnahmen. Die **Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA)** bewertet alle sechs Jahre die Klimarisiken für eine Vielzahl von Klimawirkungen der DAS-Handlungsfelder und identifiziert Handlungsbedarfe und zeigt Anpassungspotentiale auf. Die **Aktionspläne Anpassung (APAs)** enthalten die laufenden und künftigen Maßnahmen und Instrumente des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel. Die APAs werden regelmäßig aktualisiert und gemeinsam mit den Fortschrittsberichten zur DAS veröffentlicht. Die **Evaluationsberichte** analysieren alle vier Jahre den Strategieprozess und die Wirkung der DAS sowie den Umsetzungsstand der Maßnahmen der APAs.

Die Methodik der KWRA basiert auf sogenannten **Klimawirkungsketten**, die systematisch darstellen, welche klimatischen Einflussfaktoren zu welchen Klimawirkungen führen können, welche Faktoren diese Wirkung beeinflussen und wie Anpassung diese abschwächen kann (Kahlenborn et al. 2021a). Das Konzept der Klimawirkungsketten ist Bestandteil des internationalen Standards für Klimarisikoplanungen ISO 14091 (International Organization for Standardization 2021). Im Rahmen der KWRA 2021 wurden für jede Klimawirkung wesentliche Zusammenhänge dargestellt und bewertet. Ergebnis der Bewertung der Klimawirkung ist das Klimarisiko. Das **Klimarisiko** ergibt sich aus den Komponenten klimatischer Einfluss, Sensitivität, räumliche Exposition und Anpassungskapazität (Kahlenborn et al. 2021a). So führen beispielsweise starke und langanhaltende Niederschläge (Starkregen; klimatischer Einfluss) zu Hochwasser (vorgelagerte Wirkung), welches wiederum Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen (Klimawirkung) verursacht. Diese Klimawirkung wird einerseits von dem Vorhandensein von Gebäuden und Infrastrukturen in hochwassergefährdeten Gebieten, der relativen Lage zu Flüssen und deren Einzugsgebieten (räumliche Exposition) sowie von Faktoren wie dem Zustand der Gebäude, verwendete Baumaterialien oder bauliche Vorsorge (Sensitivität) beeinflusst. Tabelle 9 erläutert die zentralen Begriffe der KWRA.

Tabelle 9: Zentrale Begriffe der Klimawirkungs- und Risikoanalyse

Begriff	Erläuterung
Klimawirkung	Eine Klimawirkung beschreibt eine (potenzielle) kritische Wirkung von klimatischen Einflüssen auf das System unter Berücksichtigung der entsprechenden vorgelagerten Wirkungen, Sensitivitäten und der räumlichen Exposition. Klimawirkungen beziehen sich im Allgemeinen auf Auswirkungen auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, Ökosysteme und Arten, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemdienstleistungen) und Infrastruktur.

Klimarisiko	Das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich Risiken aus dynamischen Wechselwirkungen zwischen klimatischen Einflüssen und der räumlichen Exposition sowie der Sensitivität und Anpassungskapazität des betroffenen menschengemachten oder natürlichen Systems. Alle diese Komponenten können jeweils Unsicherheiten in Bezug auf das Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unterliegen und können sich im Laufe der Zeit und des räumlichen Bezugs aufgrund von sozio-ökonomischen Veränderungen und menschlichen Entscheidungen ändern.
Klimatischer Einfluss	Ein sich ändernden Aspekt des Klimasystems, der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst (Agard et al. 2014) Für eine Klimawirkung relevante kritischen Klimafaktoren sind beispielsweise Hitze, Starkniederschlag oder Sturm.
Vorgelagerte Wirkung	Ein auslösender Faktor, der zu einer relevanten Klimawirkung führen kann (zum Beispiel Hochwasser als vorgelagerte Wirkung für Schäden an Infrastrukturen).
Sensitivität	Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor- oder nachteilig beeinflusst wird (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014). Die Sensitivität wird durch Faktoren beschrieben, die die Klimawirkung auf ein System (zum Beispiel Wirtschaftssektor, Bevölkerungsgruppe, Ökosystem) beeinflussen. Faktoren für Sensitivität sind zum Beispiel Baumartenzusammensetzung oder Altersstruktur der Bevölkerung.
Räumliche Exposition	Vorhandensein von Systemen wie Menschen, Existenzgrundlagen, Arten bzw. Ökosystemen, Umweltfunktionen, -leistungen und -ressourcen, Infrastruktur oder ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Gegenden und Umständen, die betroffen sein könnten (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014). Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel Einwohnerdichte oder Vorkommen kritischer Infrastruktur
Anpassungskapazität	Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und anderen Lebewesen, sich auf potenzielle Schäden einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren (ISO 14091, Agard et al. 2014). Wichtige Dimensionen der Anpassung sind zum Beispiel Wissen oder Technologie.

Quelle: Darstellung auf Basis von Kahlenborn et al. (2021a) und Kahlenborn et al. (2021b).

Die Beschreibung der Wirkungskanäle des Klimawandels und seiner Interaktion mit der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung in Abschnitt 3.1.2 geschieht zur besseren Strukturierung entlang der DAS-Handlungsfelder. Zudem kann dadurch auch direkt auf die Risikobewertung der KWRA verwiesen und mit Blick auf Anpassungsoptionen und Anpassungsprozesse in Abschnitt 3.2 ein direkter Bezug zu den DAS-Handlungsfeldern hergestellt werden.

3.1.1 Literaturübersicht

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wirtschaft, Gesellschaft und Natur werden inzwischen eingehend untersucht. Neben zentralen internationalen Dokumenten des IPCC, der IEA, oder der EU-Kommission wird für Deutschland in regelmäßigen Abständen die Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) veröffentlicht. Daneben gibt es zahlreiche wissenschaftliche Einzelveröffentlichungen, die unterschiedliche Aspekte des Klimawandels detailliert beleuchten. Die hier betrachtete und ausgewertete Literatur wird nachfolgend kurz vorgestellt, bevor zentrale Wirkungsketten und Erkenntnisse herausgearbeitet werden.

Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland

Für die Abschätzung der Wirkungen des Klimawandels auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung sowie die Wertschöpfungsstrukturen ist es notwendig, zunächst die mit dem Klimawandel verbundenen Risiken, Wirkungskanäle und Interaktionen für Deutschland zu identifizieren und in einem zweiten Schritt zu quantifizieren. Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 liefert dazu eine wichtige Grundlage. Sie analysiert sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels für Deutschland als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren. Im Rahmen der KWRA 2021 wurden 13 übergeordnete Handlungsfelder sowie 102 einzelne Klimawirkungen im Hinblick auf die Höhe des Klimarisikos für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts und das Ende des Jahrhunderts bewertet. 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).

Weitere wichtige Berichte nationaler und internationaler Institutionen und Organisationen

Die Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) fassen den Wissensstand über den Klimawandel und seine Folgen, sowie über Klimaschutz und Klimaanpassung zusammen. Dabei werden sowohl bereits beobachtete Auswirkungen als auch künftig zu erwartende Auswirkungen dargestellt. Die letzte verfügbare Berichtsversion des IPCC ist der Sechste Sachstandsbericht (AR6) (IPCC 2023b). Der IPCC-Sachstandsbericht besteht aus drei Bänden, für die jeweils eine Arbeitsgruppe zuständig war, und einem übergreifenden Synthesebericht. Mit dieser Berichtsversion verwendet der IPCC fünf Szenarien, die eine Kombination von RCP und SSP-Szenarien darstellen (SSP1-1.9; SSP1-2.6; SSP2-4.5, SSP3-7.0 bzw. SSP5-8.5).

Die OECD hat einen Bericht veröffentlicht, der sich mit der dringenden Frage der bereits eingetretenen und zukünftigen klimabedingten Verluste und Schäden („losses and damages“) aus einer Perspektive des Risikomanagements befasst (OECD 2021b). Der Bericht fasst ebenfalls beobachtete und zukünftige Auswirkungen des Klimawandels zusammen, ist jedoch vor dem Sechsten Sachstandsbericht des IPCC veröffentlicht worden. Die im Report ausgewiesenen Schäden basieren auf den IPCC-Klimaszenarien.

Die Internationale Energieagentur (IEA) veröffentlicht mit dem World Energy Outlook jährlich ihre Flaggschiff-Publikation, die Erkenntnisse zu Angebot und Nachfrage auf den globalen Energiemärkten sowie zu den Auswirkungen auf die Energiesicherheit, die Klimaziele und die wirtschaftliche Entwicklung liefert.

Die Zentralbanken beziehen Klimarisiken inzwischen auch in ihre Risikosteuerung ein und verfolgen zudem das Ziel die Transformation zu einer klimaneutralen Wirtschaft zu fördern. Die Europäische Zentralbank (EZB) untersucht beispielsweise wie der Klimawandel und die politischen Maßnahmen seiner Eindämmung die Gesamtwirtschaft beeinflussen könnte, die insbesondere für die geldpolitische Bewertung der Inflationssichten durch die Zentralbanken relevant ist. Die EZB stellt dabei sowohl nachfrage- als auch angebotsseitige Auswirkungen fest, die das Potenzial haben, zu weitreichenden Störungen im Wirtschafts- und Finanzsystem zu führen. Sie stellt ebenfalls fest, dass es äußerst schwierig ist, verlässliche Schätzungen der makroökonomischen Gesamtauswirkungen des Klimawandels zu erhalten.

Strukturierte Literaturlauswertung

Ebenfalls Berücksichtigung fand die Literatur, die im Projekt „Kosten des Klimawandels für Deutschland“ gesammelt und bereits ausgewertet worden war. Sie umfasste 80 Dokumente. Diese Literaturquellen wurden um weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen ergänzt. Dazu wurde eine umfassende, strukturierte Literaturlauswertung durchgeführt.

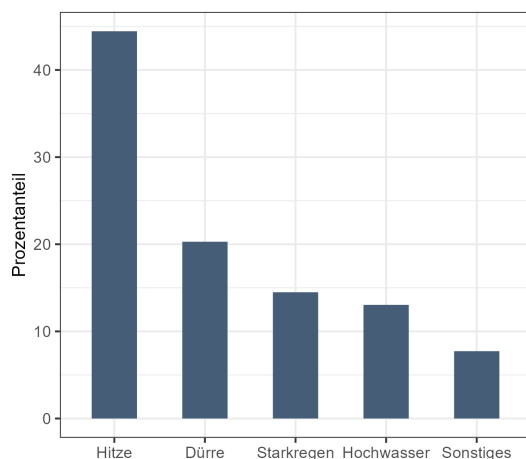
Die Datenbanken google scholar und Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft (ZBW) wurden mit unterschiedlichen Wortkombinationen zu Klimawandel, Folgen, Wirtschaft, Produktionspotenzial, Wachstum, Kosten, Output, Wirkungskanäle, Wirkungskette in Deutsch und Englisch abgefragt. Die genauen Abfragen sind in Tabelle 20 im Anhang aufgeführt. Zur Ergänzung der Literatur aus dem Projekt „Kosten des Klimawandels“ wurde nur der Veröffentlichungszeitraum 2021 bis 2023 berücksichtigt.

Es wurden insgesamt 396 Dokumente auf Basis der Schlagwortsuche gefunden. Nach einem ersten Screening wurden 317 wegen fehlender Relevanz von Titel und Abstract ausgeschlossen. Von den verbleibenden 79 Dokumenten waren nur 59 im Volltext frei verfügbar. Für weitere 16 konnte auf einen alternativen Text zurückgegriffen werden, sodass insgesamt 75 Dokumente einer Volltextanalyse unterzogen wurden. Hiervon wurden 41 inhaltlich als nicht relevant identifiziert. Die verbleibenden 34 Dokumenten wurden um 4 weitere Dokumente, die aufgrund von Expertenmeinung als besonders relevant erachtet wurden, ergänzt. Insgesamt sind daher im Rahmen der strukturierten Literaturrecherche 38 Dokumente identifiziert worden, die für die systematische Auswertung herangezogen werden konnten.

Mit der Literatur aus dem Projekt „Kosten des Klimawandels für Deutschland“ und der zusätzlich durchgeführten Literaturrecherche wurden insgesamt 118 Dokumente ausgewertet. Die Ergebnisse wurden in der Excel-Datei *Literaturübersicht_BMWK_Klima.xlsx* systematisch nach den Kategorien Autor, Titel, Jahr, DOI/Link, Klimaereignis, Handlungsfeld, Klimawirkung, Wirkungskanal, Interaktion, Untersuchungshorizont, Fristigkeit, Regionaler Fokus, Einfluss auf das Produktionspotenzial und Wertschöpfung, Verwendeter Modellierungsansatz sowie Klimaszenarien zusammengefasst.

Am häufigsten werden in der ausgewählten Literatur mit 44% die Folgen des Klimaereignisses Hitze untersucht – allein oder in Kombination mit anderen Klimaereignissen (s. Abbildung 25). Danach werden mit 20%, 15% und 13% die Extremwetterereignisse Dürre, Starkregen und Hochwasser angesprochen. Unter Sonstiges fallen Studien, welche die Folgen des Temperaturanstiegs durch die Erderwärmung bzw. eines anderen Extremwetterereignisses betrachten oder keinem direkten Klimaereignis zugeordnet werden konnten.

Abbildung 25: Verteilung der untersuchten Klimaereignisse in der ausgewählten Literatur

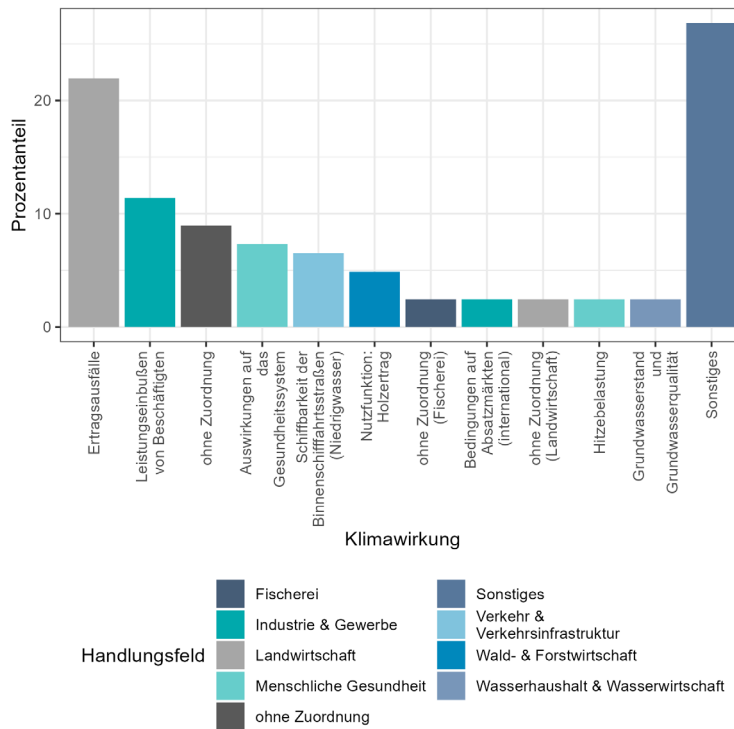


Quelle: eigene Auswertung.

Die Literatur wurde zudem den 13 Handlungsfeldern und den jeweils zugehörigen, insgesamt 102 einzelnen Klimawirkungen der KWRA 2021 zugeordnet. Abbildung 26 zeigt die am häufigsten untersuchten Handlungsfelder mit den jeweiligen betrachteten Klimawirkungen. Unter Sonstiges fallen alle Handlungsfelder und Klimawirkungen, die höchstens zweimal in der Auswahl angesprochen wurden. Mit über 20% fokussieren sich die Studien häufig auf Ertragsverluste im Handlungsfeld Landwirtschaft. Hinzu kommen noch Studien in diesem Handlungsfeld, die sich nicht direkt einer Klimawirkung zuordnen lassen. Weitere 14% der Veröffentlichungen betreffen das Handlungsfeld Industrie & Gewerbe, wobei der Großteil sich mit Leistungseinbußen von Beschäftigten beschäftigt, die übrigen untersuchen die Bedingungen auf den Absatzmärkten. 9% der Studien lassen sich keinem Handlungsfeld und keiner Klimawirkung direkt zuordnen. Hier werden häufig die generellen Folgen des Klimawandels auf das globale oder nationale Wirtschaftswachstum untersucht. Das Handlungsfeld Menschliche Gesundheit wird von fast 10% der Veröffentlichungen angesprochen, wobei die Auswirkungen auf das Gesundheitssystem mehr untersucht wird als die Hitzebelastung. Es folgen Studien aus

dem Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur zu Niedrigwasser und aus dem Feld Wald- und Forstwirtschaft zum Holzertrag mit Anteilen von 7% bzw. 5% an den ausgewählten Studien.

Abbildung 26: Verteilung der ausgewählten Literatur auf Handlungsfelder und Klimawirkungen



Quelle: eigene Auswertung.

3.1.2 Wirkungskanäle

Basierend auf der Literatursauswertung werden die Wirkungskanäle für die in den Publikationen angesprochenen Handlungsfelder detailliert ausgewertet. Die Handlungsfelder umfassen Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft, Menschliche Gesundheit, Verkehr und Verkehrsinfrastruktur sowie Fischerei. Auch Folgen des Klimawandels ohne direkte Zuordnung werden thematisiert.

Im Handlungsfeld **Landwirtschaft** wird vor allem die Klimawirkung Ertragsverluste vor dem Hintergrund der pflanzlichen Produktion diskutiert. Die Argumentation folgt dabei unabhängig vom Klimaereignis der Argumentationskette, dass die Ernte infolge der klimawandelbedingten Klimawandelereignisse Hitze, Dürre, Starkregen oder Überschwemmungen geringer ausfällt und dadurch die Erträge zurückgehen. Die Verringerung der landwirtschaftlichen Produktivität mit einhergehenden niedrigeren Erträgen lässt sich als Folge des Klimawandels bereits beobachten (IPCC 2022; OECD 2021b; Renner et al. 2021). Die Verluste und Schäden werden zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit weiter zunehmen (IPCC 2022). In der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland wird das Klimarisiko für Ertragsausfälle bis zur Mitte des Jahrhunderts bei geringer Gewissheit als mittel bis hoch bewertet (Renner et al. 2021).

Weltweit auftretende Ertragsverluste und ein damit einhergehendes global vermindertes Angebot an Agrarprodukten führt zudem zu Preissteigerungen bei landwirtschaftlichen Produkten mit entsprechend preistreibenden Effekten bei nachgelagerten Industrien und Lebensmittelpreisen (Batten et al. 2020; Peter et al. 2020; Winne & Peersman 2021). Die zu erwartende Höhe der Preissteigerungen liegt zwischen 3% und 37% (Peter et al. 2020; Ren et al. 2018; Wang et al. 2018).

Diskutiert und hochgradig unsicher sind die Möglichkeiten und Auswirkungen von CO₂-Fertilisation (Bosello et al. 2020; Reilly et al. 1994; Ren et al. 2018). CO₂-Fertilisation bezieht sich auf den Prozess, bei dem erhöhte Kohlendioxid (CO₂)-Konzentrationen in der Atmosphäre das Pflanzenwachstum fördern. Dieses Phänomen tritt auf, weil CO₂ ein wesentlicher Bestandteil der Photosynthese ist, dem Prozess, bei dem Pflanzen Sonnenlicht nutzen, um Wasser und CO₂ in Zucker und Sauerstoff umzuwandeln. Die CO₂-Fertilisation ist ein komplexer Vorgang, deren langfristigen Vorteile nicht garantiert sind, da Faktoren wie Nährstoffverfügbarkeit im Boden, Wasserstress, Klimawandel und andere Umweltbedingungen die positiven Effekte einschränken können. Zudem kann nicht jede Pflanzenart eine erhöhte CO₂-Konzentration gleich gut verwerten (Jägermeyr et al. 2021). Die jeweiligen Modellannahmen und die tatsächliche Wirksamkeit von CO₂-Fertilisation ist daher entscheidend dafür, wie der Klimawandel auf die Ertragsentwicklung in der Landwirtschaft wirkt.

Mit Blick auf die einzelnen Klimaereignisse ist bei Hitze und Dürre entscheidend, wie hoch der Grad der Ausprägung ist, zu welchem Zeitpunkt des Wachstumszyklus das Ereignis eintritt, welches Produkt betroffen ist und wie hoch die Wasserverfügbarkeit für Bewässerung ist. Bis zu einer Temperatur von 29°C steigt beispielsweise der Ertrag von Mais, ein ganzer Tag mit 32°C hingegen führt bereits zu einer Ertragsminderung von 1% (Schlenker & Roberts 2009). Zum Vergleich ist Hirse sehr trockenresistent und wirft mit steigenden Temperaturen eher steigende Erträge ab (Wang et al. 2018). Grundsätzlich ist mit steigenden Temperaturen und verringertem Niederschlag aber bei den meisten Getreidearten mit Ertragsminderungen zu rechnen. Modellrechnungen auf Basis von Klimaszenarien für unterschiedliche CO₂-Konzentrationen weisen für Zeiträume bis zur Mitte des Jahrhunderts in Abhängigkeit von Region und Getreideart Spannbreiten bei Ertragsverlusten von -2% bis -50% aus. (Wang et al. 2018; Jägermeyr et al. 2021; Malhi et al. 2021). Autoren, welche ex-post den statistischen Zusammenhang zwischen Erwärmung und Ertragsveränderungen untersuchen, weisen für 1°C Temperaturanstieg -3% bis -12% als Ertragsänderung aus, wobei die Werte abhängig von der untersuchten Region und der Getreideart sind (Hsiang et al. 2017; Schlenker & Roberts 2009; Wang et al. 2018; You et al. 2009; Malhi et al. 2021). Zudem wurde festgestellt, dass sich wärmere Temperaturen während der Grünsaison negativ auf das Wachstum der totalen Faktorproduktivität der Landwirtschaft auswirkt, wobei der negative Einfluss mit steigenden Temperaturen zunimmt und die globale Landwirtschaft dadurch zunehmend empfindlicher reagiert (Ortiz-Bobea et al. 2021). Während höhere Temperaturen im Frühjahr das Pflanzenwachstum fördern, wird es hingegen bei übermäßig hohen Temperaturen in den Sommermonaten (ab Juni) behindert, wodurch die zu erwartende größere Trockenheit und Hitze im Sommer zu einer insgesamt niedrigeren Produktivität führt (Egerer et al. 2023). Der negative Gesamteffekt gilt sowohl für Szenarien mit niedriger CO₂-Konzentration (RCP 2.6) als auch mit sehr hoher (RCP 8.5) (Egerer et al. 2023).

Damit einhergehend führt auch eine Verschiebung des Niederschlags vor allem in das Frühjahr mit längeren Trockenphasen in Sommer und Herbst zu negativen Effekten für den Ernteertrag, vor allem bei Wintergerste, Winterroggen, Raps, Mais und Zuckerrüben (Donmez et al. 2023; Egerer et al. 2023).

Kann die Bewässerung infolge von Wasserknappheit und konkurrierenden Nutzungsbedürfnissen zukünftig nicht mehr als Ausgleich der Trockenheit ausreichend gewährleistet werden, verstärken sich die Negativeffekte auf die Erträge: Eine verminderte Verfügbarkeit von Wasser zur Bewässerung z.B. entlang der Elbe resultiert in Ertragsverlusten von 11%-15% (Hattermann et al. 2008). Ausreichend Wasserverfügbarkeit zur Bewässerung hingegen kann die durch den Klimawandel zu erwartenden Ertragsverluste durch Hitze und Trockenheit auf -0,5% bis -1,1% zurückdrängen (Egerer et al. 2023). Die besonders enge Querverbindung zu Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft stellt auch die Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland fest (Renner et al. 2021).

Auch die Folgen von Starkregen und Hochwasser wirken sich grundsätzlich negativ auf die Erträge in der Landwirtschaft aus. Allerdings ist das Ausmaß der negativen Effekte bei Nässeextremen geringer als bei Temperaturextremen (Lesk et al. 2016; Li et al. 2019; Vogel et al. 2019).

Des Weiteren verursacht der Temperaturanstieg eine Zunahme der Pflanzenschädlinge und Pflanzenkrankheiten, wodurch die Erträge ebenfalls negativ beeinflusst werden (Donmez et al. 2023; Renner et al. 2021).

Daneben wird in der KWRA (Renner et al. 2021) noch der Hitzestress bei Tieren hervorgehoben: Dieser verringert neben dem Wohlbefinden auch die Leistungsfähigkeit von Nutztieren mit entsprechend geringeren Erträgen z.B. bei Milchvieh, mehr Totgeburten bei ferkelführenden Sauen oder geringerer Qualität bei Eiern. Allerdings wird dieses Klimarisiko bis zur Mitte des Jahrhunderts bei mittlerer Gewissheit nur gering bis mittel bewertet (Renner et al. 2021).

Die Wirkung des Klimawandels im Handlungsfeld **Wald- und Forstwirtschaft** wird meist vor dem Hintergrund Hitze- und Trockenstress bzw. Holzertrag zusammen mit den Klimaereignissen Dürre und Hitze diskutiert: Hitze und Dürre erhöhen das Risiko von Waldbränden, Baumsterben, Schäden durch Schadorganismen und mindern dadurch die Nutzfunktion der Wälder für den Holzertrag (Allen et al. 2015; Buth et al. 2015; Renner et al. 2021). So wird die Nutzfunktion der Wälder maßgeblich von der effektiven Wasserbilanz, der Zusammensetzung der Wälder, den regionalen Gegebenheiten, aber auch direkt von der Temperatur beeinflusst (Allen et al. 2015; Buth et al. 2015; Lantz et al. 2022). Daneben spielen sekundäre Klimawirkungen wie Schäden durch Schadorganismen, Wind, Art der Hitze und Waldbrand eine Rolle, wobei Schäden durch Schadorganismen vom Temperaturverlauf und Niederschlag bestimmt werden (Buth et al. 2015).

In der Vergangenheit ließ sich für Europa durch den gemäßigten Temperaturanstieg ein positiver Trend in der Nettoprimärproduktion (gemessen an der Breite der Jahresringe) ablesen (Tei et al. 2017). Durch die Zunahme von Wetterextremen und insbesondere die wachsende Trockenheit ist die zukünftige Entwicklung der Produktivität nicht eindeutig (Tei et al. 2017). Für Deutschland liegt die Bandbreite einer möglichen Entwicklung von positiv bis negativ (Bosello et al. 2020; Tei et al. 2017). Die Vulnerabilität von

Wäldern wird jedoch zukünftig zunehmen und es ist möglich, dass das Baumsterben schneller ist als die Wiederaufforstung (Allen et al. 2015). Zudem nimmt die Landfläche für eine potenzielle Waldnutzung tendenziell ab (Alegria et al. 2020) und je nach vorherrschender Baumart wird sich die Ertragslage entwickeln: während Laubholz zukünftig einen unverändert hohen Ertrag liefern könnte, ist bei Nadelschnittholz ein Ertragsverlust von bis zu 26% möglich (Lantz et al. 2022).

In der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland wird für das das Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft das Klimarisiko für Stress durch Schädlinge und Krankheiten bzw. Hitze- und Trockenstress bis zur Mitte des Jahrhunderts bei mittlerer Gewissheit als mittel bis hoch bewertet (Renner et al. 2021). Diese Schäden, die sich aus Dürre und Hitze ergeben, schlagen sich letztendlich auf Verfügbarkeit und Qualität des Holzes nieder mit verringerten Erträgen. Gleichzeitig entstehen durch Aufräumarbeiten nach Stürmen und Schädlingsmanagement erhöhte Aufwendungen und damit Stückkosten, die Preisänderungen nach sich ziehen werden (Renner et al. 2021). Das Risiko von Ertragsminderungen wird ebenfalls mit mittlerer Gewissheit als mittel bis hoch bewertet (Renner et al. 2021).

Dem Handlungsfeld **Fischerei** wird gesamtwirtschaftlich keine große Bedeutung beigegeben, regional ist der Fischereisektor jedoch ein bedeutender Arbeitgeber (Fritsch et al. 2021). Herausforderungen sind nicht nur die Folgen des Klimawandels, sondern insbesondere auch die Auswirkungen der Überfischung. Im Rahmen der KWRA wurde die Seefischerei und der fischereiliche Sektor im Binnenland getrennt betrachtet, wobei die Klimawirkungen „Abiotischer Stress“, „Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ und „Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum“ aufgrund der engen Verbindungen jeweils integriert betrachtet bzw. zu einem Wirkkomplex zusammengefasst wurden und dann für einzelne Fischarten spezifiziert wurden. Sensitiv gegenüber den Folgen des Klimawandels sind insbesondere Anlagen, aber auch Fischbestände, die räumlich nicht ausweichen können.

Die ermittelten Wirkungen des Klimawandels auf die im Rahmen der Studien betrachteten Seegebiete bzw. Territorien zeigen kein einheitliches Bild. Dee et al. (2016) skizzieren, dass Hitzeextreme zu einer großen Variabilität in der Meerestemperatur und zu starken Temperaturschwankungen führen, was einerseits zu Fischsterben und geringeren Erträgen führt, andererseits aber durch Veränderungen beim Laichen und in der Phänologie auch zu höheren Erträgen führen kann, insgesamt ergeben sich signifikant geringere Gesamterträge in großen marinen Ökosystemen, wenn die funktionelle Vielfalt gering ist. Die funktionelle Vielfalt kann die Verluste jedoch zum Teil ausgleichen. Funktionelle Vielfalt ist eine Dimension der Biodiversität (ESKP 2024). Sie beschreibt die Bandbreite und den Wert der verschiedenen funktionellen Merkmale, die die Arten in Ökosystemen aufweisen und die das Funktionieren des Ökosystems beeinflussen (Tilman 2001). Zu den Merkmalen zählen beispielsweise Verhaltens- und Ernährungsweise der Arten (ESKP 2024). Arten lassen sich in funktionale Gruppen einteilen, die ähnliche Merkmale aufweisen und die daher wahrscheinlich ähnliche Auswirkungen auf das Funktionieren des Ökosystems haben (Tilman 2001). Nach Barange et al. (2014) sind künftig überwiegend positive Auswirkungen auf das Fischproduktionspotenzial zu erwarten, während die Ergebnisse von Froehlich et al. (2018) darauf hindeuten, dass sich das

Produktionspotenzial der marinen Aquakultur (Süßwasser und Salzwasser) in den meisten Ländern rückläufig entwickelt.

Die Klimarisiken Stress durch Schädlinge bzw. Krankheiten sowie Schäden an Aquakulturen werden bis zur Mitte des Jahrhunderts bei mittlerer Gewissheit nur gering bis mittel bewertet (Fritsch et al. 2021).

Das Handlungsfeld **Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft** ist durch die Bedeutung der Ressource Wasser für Natur, Mensch und Wirtschaft von zentraler Relevanz in einer Vielzahl von Wirkungsketten und der Daseinsvorsorge (Fritsch et al. 2021). In der gesichteten Literatur wird es vor allem in Zusammenhang mit den Klimawirkungen Niedrigwasser, Grundwasserstand und -qualität, Mangel an Bewässerungswasser sowie Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen diskutiert. Es ist eng mit anderen Handlungsfeldern verknüpft und hat meist vorgelagerten Charakter.

Der Klimawandel wirkt unterschiedlich auf das Wetter ein. Zum einen steigt die globale Durchschnittstemperatur, wodurch Jahreszeiten wärmer werden und damit im Sommer häufiger und intensivere Hitzewellen vorkommen werden. Auch Niederschlagsmuster ändern sich dahingehend, dass es zu intensiveren und häufigeren Regenfällen insbesondere im Herbst und Winter kommen kann. Insgesamt nehmen Extremwetterereignisse wie Hitze, Dürre, Starkregen, Überschwemmungen, Hochwasser und Stürme zu. Ein niedriger Wasserstand in Flüssen infolge von Hitze und Dürre führt zu weniger Grundwasserneubildung. Verstärkend kann hinzukommen, dass trotz Niederschlagszunahmen ein positiver Einfluss auf den Grundwasserstand durch Verdunstung nicht eintreten kann. Als Folge stellt sich ein geringeres Wasserangebot ein, wobei v.a. Länder im Nahen Osten, Teilen Afrikas, Teilen Asiens von dieser Wirkung betroffen sind, während für Europa und Nordamerika kaum Effekte erwartet werden (Roson & Damania 2017). Für die globale Wirtschaftsleistung resultieren Verluste bis 2050 in Höhe von 0,2% bis 0,5%.

Durch Hitze und Dürre kann auch der Grundwasserspiegel per se fallen, verbunden mit einem Rückgang der Quellschüttung und einem eingeschränkten bzw. beendeten Brunnenbetrieb. Als Ergebnis wird weniger Wasser bereitgestellt (Bender et al. 2021). Meist steht dem aber eine Erhöhung der Spitzenverbräuche und eine verstärkte Wassernachfrage gegenüber (Bender et al. 2021). Daneben steigt mit höheren Außentemperaturen auch die Temperatur von Roh- und Trinkwasser, woraus sich höhere Anforderungen an die Wasserbereitstellung und -aufbereitung ergeben (Bender et al. 2021). Zusammengekommen lassen sich aus der Verknappung des Angebots und erhöhten Bereitstellungsanforderungen steigende Preise ableiten. Insbesondere die Konkurrenz von Landwirtschaft, industriellen Wassernutzern und der Trinkwasserversorgung um Wasser lassen zukünftig Konflikte vermuten (Egerer et al. 2023). Mit dem Klimawandel werden sich die Niederschläge in den Herbst, Winter und das Frühjahr verlagern und im Sommer eher seltener auftreten mit einer gleichzeitig erhöhten Evapotranspiration¹⁹, wodurch es zu einem Nettowasserdefizit während Wachstumsperiode in der Landwirtschaft von April

¹⁹ Evapotranspiration ist ein wesentlicher Prozess im globalen Wasserkreislauf, der das Wasser von der Erdoberfläche in die Atmosphäre transportiert. Er setzt sich aus der direkten Verdunstung (Evaporation) und der indirekten Verdunstung über Pflanzen (Transpiration) zusammen.

bis August kommt. Die Trockenheit bedingt einen erhöhten Wasserbedarf, der durch Produktionssteigerungen verschärft werden kann (Egerer et al. 2023). Zwischen 2010 und 2015 ist die bewässerte Fläche in der Landwirtschaft bereits um 6% gestiegen, um Ertragsrückgängen entgegenzuwirken, wobei sich bereits in der Vergangenheit eine maximal niedrige Grundwasserneubildung eingestellt hat (Fliß et al. 2021).

Neben Hitze und Dürre können auch Starkregen und Hochwasser die Anforderungen an die Bereitstellung und Aufbereitung von Wasser erhöhen: Starkregen und Hochwasser können die Überschwemmung und Verschmutzung der Infrastruktur oder elektrischer Anlagen sowie eine damit verbundene aufwändige Flutung des Brunnenschachtes zur Wartung und Reinigung des Brunnens nach sich ziehen (Bender et al. 2021). Des Weiteren kann es zu Trübungseinbrüchen²⁰ infolge von Undichtigkeiten oder Kurzschlussströmungen am Fassungsbauwerk²¹ kommen (Bender et al. 2021), was die Wasserqualität verschlechtert, durch Verstopfungen höhere Wartungskosten von Pumpen und Ausrüstungen verursacht und langfristig die Lebensdauer des Brunnens verkürzen kann. Nach Barrage (2023) würde eine Aufrechterhaltung des Leistungsniveaus der städtischen Entwässerungssysteme nach Starkregen oder Hochwasser einen Mehraufwand von +1,83 Mrd. Dollar pro Jahr pro Grad Erwärmung bedeuten. Als Referenz dienten 100 wichtige Städte in den USA (Barrage 2023).

In der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland wird das Klimarisiko Niedrigwasser bei geringer Gewissheit für die Mitte des Jahrhunderts als mittel bis hoch eingestuft, das Klimarisiko Grundwasserstand und Grundwasserqualität mit mittlerer Gewissheit als gering bis hoch sowie das Klimarisiko Mangel an Bewässerungswasser und das Klimarisiko Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen mit mittlerer bzw. geringer Gewissheit als gering bis mittel (Fritsch et al. 2021). Insgesamt wird das gesamte Klimarisiko dieses Handlungsfelds als mittel bis hoch eingestuft (Fritsch et al. 2021).

Das Handlungsfeld **Verkehr und Verkehrsinfrastruktur** ist mit vielen anderen Handlungsfeldern eng verknüpft und ihm wird eine hohe Bedeutung aus ökonomischer, sozialer aber auch ökologischer Perspektive beigemessen (Voß et al. 2021). Im Experten Netzwerk des Verkehrsministeriums (heute BMDV-Experten Netzwerk, früher BMVI-Experten Netzwerk) ist den Auswirkungen des Klimawandels auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur ein eigenes Themenfeld gewidmet (Voß et al. 2021). Das Handlungsfeld umfasst die Klimawirkungen auf die vier Verkehrsträger: Straße, Schiene, Wasserstraße und Luftverkehr, die jeweils Güter und Personen transportieren. Besondere Bedeutung kommt den Klimawirkungen Schäden und Hindernisse durch Hochwasser und durch gravitative Massenbewegungen (Bergsturz, Felssturz, Steinschlag, Rutschungen und Muren) für die Verkehrsträger Straße und Schiene sowie die Schiffbarkeit von

²⁰ Trübungseinbrüche bezeichnen das Eindringen von Partikeln, Sedimenten oder anderen Verunreinigungen in das Wasser eines Brunnens, wodurch das Wasser getrübt wird. Solche Einbrüche können die Wasserqualität stark beeinträchtigen.

²¹ Kurzschlussströmungen am Fassungsbauwerk eines Brunnens sind unerwünschte Wasserströmungen, die entstehen, wenn Wasser auf direktem Weg in den Brunnenschacht gelangt, ohne ausreichend durch das umgebende Gestein oder Bodenmaterial gefiltert zu werden.

Binnenschifffahrtsstraßen durch außergewöhnliche hohe oder niedrige Wasserstände zu (Voß et al. 2021).

Die Beeinträchtigung der Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen durch Niedrigwasser oder Hochwasser führt zu Beeinträchtigungen des Warenverkehrs über Wasserstraßen. Es kommt zu Verringerungen der Transportmengen und Erhöhung der Transportkosten, sodass möglicherweise Lieferverzögerungen und/oder Verlagerungen auf andere Verkehrsträger erfolgen (Voß et al. 2021). Hochwasserereignisse sind im Gegensatz zu Niedrigwasserereignissen gesamtwirtschaftlich weniger relevant, da sie insbesondere weniger lange andauern (Voß et al. 2021).

Über Binnenschifffahrtsstraßen werden insbesondere Masse- und Schüttgüter transportiert (DLR et al. 2022). Die Beeinträchtigungen des Warenverkehrs über Wasserstraßen können somit nennenswerte Auswirkungen auf schifffahrtsnutzende Unternehmen und weitere nachgelagerte Produktionsstufen haben. In einer empirischen Studie zu Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Binnenschifffahrt und Industrieproduktion in Deutschland kommt zu dem Resultat, dass ein Tag Niedrigwasser im Monat die beförderte Menge um 0,76 Prozent mindert, ein Monat mit 30 Tagen Niedrigwasser die beförderte Menge um 20 Prozent (Ademmer et al. 2018; Ademmer et al. 2020). Durch reduzierte Transportmengen steigen die Transportkosten mit fallendem Pegel überproportional, zur Kompensation wird ein Kleinwasserzuschlag in Abhängigkeit des Pegels berechnet (Contargo GmbH & CO. KG 2017).

Es ist davon auszugehen, dass Niedrigwasser an deutschen Binnenschifffahrtsstraßen in Zukunft verstärkt auftreten und intensiver werden, insbesondere ab der Mitte des Jahrhunderts (Nilson et al. 2020). In Szenario-Rechnungen werden für die Mitte des Jahrhunderts moderate Verringerungen der Transportmengen bis 10 Prozent sowie moderate Veränderungen der Transportkosten projiziert, wobei Ende des Jahrhunderts stärkere Rückgänge der Transportmengen bis -25% möglich sind (Nilson et al. 2020; Nilson et al. 2014; BMIV 2015; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015).

Insgesamt werden in der Klima- und Risikoanalyse für Deutschland die Klimarisiken für das gesamte Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur bis zur Mitte des Jahrhunderts als gering bis mittel eingestuft (Voß et al. 2021). Ein mittleres bis hohes Risiko ergibt sich ausschließlich für die Klimawirkung Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen (Voß et al. 2021).

Das Handlungsfeld **Industrie und Gewerbe** wird überwiegend im Kontext Leistungseinbußen von Beschäftigten, Beeinträchtigung des Warenverkehrs bzw. Warentransports, Lieferketten (Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten) sowie Bedingungen auf den Absatzmärkten diskutiert.

Die Leistungseinbuße von Beschäftigten tritt im unmittelbaren Zusammenhang mit Hitzeextremen auf: Die wirtschaftliche Produktivität ist bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 13°C maximal und fällt danach nicht linear, wodurch Europa bis 2021 mit einem Anstieg des BIP pro Kopf profitieren haben könnte (Burke et al. 2015). Die Studie kommt allerdings auch zu dem Ergebnis, dass das globale Durchschnittseinkommen bis 2100 beim voranschreitenden Klimawandel um 23% geringer ausfallen dürfte. Wichtig ist hierbei also der betrachtete Detailgrad und Zeitraum. Für einzelne Monate und

einzelne Wirtschaftszweige (v.a. Baugewerbe, Gartenbau, Straßenbau, Pflegeberufe) können die Wirkungen erheblich sein (Bernardt et al. 2024). Die Hitzewellen 2003, 2010, 2015, 2018 haben z.B. zu einer Reduktion in der europäischen Wirtschaftsleistung um 0,3% bis 0,5% geführt (García-León et al. 2021). Zudem zeigt sich, dass ein Teil der Produktivitätsverluste durch Überstunden an kälteren Tagen ausgeglichen werden: In einer Umfrage von Zander et al. (2015) gaben 70% der Befragten an, dass sie an heißen Tagen um 35% weniger produktiv waren, gleichzeitig machten aber auch 25% Überstunden, um Produktivitätsverluste auszugleichen.

Grundsätzlich führt Hitze zu einer geringeren Konzentration, erhöhtem Unwohlsein, Gesundheitsproblemen sowie einer Zunahme von Arbeitsunfällen und Verletzungen. In Räumen gilt dies für eine Raumtemperatur ab 26°C (Bux 2006). Ab 30°C wird nur noch 70% der Leistungsfähigkeit erbracht (Hübler et al. 2008). Als Folge reduziert sich die Arbeitszeit, da vor dem Hintergrund des Arbeitsschutzes vermehrt und länger Pausen für den Gesundheitsschutz und gegen Hitzeerschöpfung eingelegt werden müssen. Allerdings ist die Arbeitszeitreduktion infolge der unterschiedlich hohen Ausgangstemperaturen und der zukünftigen Erwärmung regional sehr ungleich verteilt mit niedrigen Werten zwischen -0,1% und -0,2% für Länder in Nord-, Ost- und Westeuropa sowie im südlichen Lateinamerika und sehr hohen Einbußen von -11,4% bis -26,9% in Südostasien, Anden, Zentralamerika, Östliches subsaharisches Afrika und die Karibik (ILO 2019; Kjellstrom et al. 2016; Kjellstrom et al. 2018; Takakura et al. 2017). Der Bau- und der Primärsektor sind durch ihre Arbeit im Freien immer negativ von Hitzeerscheinungen betroffen, während Produktion und Dienstleistungen nur Einbußen verzeichnen, wenn nicht mehr als 50% der Beschäftigten Zugang zu einer Klimaanlage haben (Takakura et al. 2017). Insgesamt wird global bis 2030 bei einem Temperaturanstieg zwischen 1995 und 2030 um 1,3°C mit einem Verlust an Arbeitsstunden in Höhe von 2,2% gerechnet (ILO 2019). Hsiang et al. (2017) schätzen, dass sich in den USA je Grad Erwärmung die Zahl der gearbeiteten Stunden um ca. 0,11% bei wenig exponierten Tätigkeiten wie Büroarbeit und 0,53% bei stark exponierten Tätigkeiten wie Bauwirtschaft, Tagebau, Landwirtschaft und Produktion verringert.

Die verringerte Arbeitsfähigkeit und reduzierten Arbeitsstunden äußern sich schließlich in einer verringerten Arbeitsproduktivität und einer geringeren Wirtschaftsleistung mit den jeweiligen regionalen Unterschieden: Die Arbeitsproduktivitätsverluste können Werte zwischen 3% und 12% einnehmen (Bux 2006), für tropische und mittlere Breitengrade erreichen sie bis 2050 sogar -20% (Dunne et al. 2013). In Deutschland werden die Verluste bis 2045 unter 0,25% des BIP liegen und auch danach bis 2064 keine Werte über 0,5% des BIP erreichen (García-León et al. 2021). Auch Szewczyk et al. (2021) gehen für Deutschland von Produktivitätseinbußen ohne Anpassungsmaßnahmen von unter 1% aus. In der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland wird das Klimarisiko der Leistungseinbußen von Beschäftigten bei mittlerer Gewissheit für die Mitte des Jahrhunderts als gering bis mittel eingestuft (Wolf et al. 2021b).

Der Einfluss einer hitzebedingten geringeren Arbeitsproduktivität erreicht Deutschland vielmehr über die Handelsstruktur: Besonders kritisch ist der Produktivitätsverlust in den südlichen Ländern, vor allem in Südostasiatischen Ländern, dem mittleren Osten, Zentralafrika, der Region Golf von Guinea und der Amazonas Region zu sehen, der sich über die Handelsbeziehungen weltweit auswirkt. Geringe Arbeitsproduktivitäten bringen

niedrigere Produktionsmengen und ein geringeres Angebot mit sich, wodurch die Preise für gehandelte Waren aus den betroffenen Ländern steigen werden. Für Deutschland kommt es einerseits zu Verschiebungen in der Importstruktur: Die Zahl der außereuropäischen Importe geht zurück und wird zum Teil von Importen aus europäischen Ländern ausgeglichen (Knittel et al. 2020; Peter et al. 2020). Gleichzeitig bewirken die damit verbundenen Preisänderungen, dass das BIP um 0,4% niedriger ist und die Wohlfahrt um 0,5% (Knittel et al. 2020). Insgesamt führt die Beeinträchtigung internationaler Märkte durch Extremwetterereignisse zu einem weltweiten Exportrückgang bis 2060 um 1,8% (Wolf et al. 2021b). Eine hohe Exportvulnerabilität liegt vor allem bei Exportprodukten wie Maschinen, chemischen Erzeugnissen, Kraftwagen und Kraftwagenteilen vor, während sich v.a. im Bau, aber auch der Chemiebranche Chancen durch die Erschließung neuer Absatzmärkte ergeben (Wolf et al. 2021b). In der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland wird das Klimarisiko der Bedingungen auf den internationalen Absatzmärkten bei geringer Gewissheit für die Mitte des Jahrhunderts als gering bis mittel eingestuft (Wolf et al. 2021b). Gleichzeitig deuten Studien mit besonders großen globalen Einkommensverlusten auf deutlich höhere Verwerfungen hin, welche die deutsche Wirtschaft stark treffen könnten (z.B. Kotz et al. (2024b)).

Daneben wirken auch Extremwetterereignisse im Ausland wie Hitze, Dürre, Starkregen und Hochwasser auf die deutsche Wirtschaft ein, wenn die Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten oder der internationale Warentransport dadurch beeinträchtigt ist. Durch Wetterextreme steht weniger Land zur Verfügung, das für natürliche Ressourcen genutzt werden kann, wodurch sich wiederum Rohstoffe verknappen bzw. an Qualität verlieren. Bis 2059 könnten 40% bis 78% weniger Rohstoffe verfügbar sein und verbunden mit der Angebotsverknappung eine Preissteigerung von 66% bis 130% verursacht werden (Er-Kara et al. 2020). Insbesondere die Produktionsstandorte von Zinn, Bauxit, Kupfer und Eisenerz befinden sich in hochvulnerablen Ländern, sodass extreme Wetterereignisse wie Überschwemmungen und Wirbelstürme ein hohes Risiko für Rohstoffgewinnung sowie Lieferkette darstellen (Rüttinger et al. 2020).

Extremwetterereignisse führen auch zu Störungen bei den logistischen Abläufen, was verlängerte Lieferzeiten oder sogar eine Unterbrechung der Lieferkette zur Folge haben kann. Die Logistikkosten können dadurch aufgrund von zusätzlichen Transport-, Arbeits- und Lagerhaltungskosten infolge erhöhter Vorlaufzeiten und der Vorhaltung von Produkten bis 2059 um 60% bis fast 100% steigen (Er-Kara et al. 2020).

In der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland wird das Klimarisiko der Beeinträchtigung der internationalen Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten bei geringer Gewissheit für die Mitte des Jahrhunderts als mittel bis hoch eingestuft und die Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs bei mittlerer Gewissheit als gering bis mittel (Wolf et al. 2021b).

Des Weiteren beeinträchtigt das Klimaereignis Hitze den inländischen Warenverkehr über Wasserstraßen. Infolge von Niedrigwasser kommt es zu einer verringerten Schiffbarkeit der Binnengewässer, wodurch nur noch geringeres Volumen transportiert werden kann. Schlimmstenfalls muss der Schiffsverkehr vollständig gestoppt werden. Daraus können Lieferengpässe mit einer gedrosselten bzw. ausgesetzten Produktion folgen. So bedeuten 30 Tage Niedrigwasser auf dem Rhein 25% weniger Transport und

eine Reduktion der Industrieproduktion um 1% oder anders ausgedrückt bedeutet eine Verringerung des Transportvolumens auf Schiffen um 1% einen Verlust in der Industrieproduktion von 0,04% (Ademmer et al. 2020). Die Niedrigwasserperiode in der zweiten Hälfte von 2018 hatte beispielsweise einen maximalen Einfluss auf die Industrieproduktion von -1,5% (Ademmer et al. 2020). In der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland wird das Klimarisiko der Beeinträchtigung des inländischen Warenverkehrs über Wasserstraßen bei mittlerer Gewissheit für die Mitte des Jahrhunderts als mittel bis hoch eingestuft (Wolf et al. 2021b).

Im Handlungsfeld **Menschliche Gesundheit** werden mit Hitzebelastung, Auswirkungen auf das Gesundheitssystem und Leistungseinbußen von Beschäftigten insbesondere die Klimawirkungen eingehend betrachtet, die in Verbindung mit dem Klimaereignis Hitze stehen. Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse beleuchtet zudem noch Klimawirkungen, die menschliche Gesundheit indirekt betreffen (Wolf et al. 2021b). Beispielsweise weitet sich mit steigenden Temperaturen vermutlich die Pollensaison aus oder es können sich Krankheitserreger etablieren, die bisher nicht in Deutschland verbreitet waren. Diese Klimawirkungen lassen sich bisher jedoch nicht ökonomisch quantifizieren.

Hitze führt zu gesundheitlichen Belastungen, die zu einem Anstieg hitzebedingter Erkrankungen und zu einem Anstieg der Todesfälle führen sowie zur Verschlimmerung bestehender Gesundheitsprobleme beitragen. Besonders gefährdet durch Hitzebelastung sind ältere Menschen (Hsiang et al. 2017; Hübler et al. 2008). Diese gesundheitlichen Belastungen haben durch vermehrten Arztbesuche, Krankenwageneinsätzen und Krankenhauseinweisungen Auswirkungen auf das Gesundheitssystem (Bobb et al. 2014; Ebi et al. 2021; Kjellstrom 2016; Schmuker 2021) und führen zu höheren Gesundheitsausgaben (Barrage 2023; Hübler et al. 2008; Hübler 2014; Karlsson & Ziebarth 2018; Limaye et al. 2019).

Hinsichtlich der Auswirkungen auf das Gesundheitssystem sind für Deutschland insbesondere drei Studien zu nennen, die auf Basis verschiedener Datenbasen, Zeiträume und zukünftiger Klimaszenarien zukünftige Krankenhauseinweisungen und damit zusammenhängend zusätzlich zu erwartende Gesundheitsausgaben abschätzen. Klauber & Koch (2021) haben auf Basis der Versicherungsdaten der AOK für den Zeitraum von 2008 bis 2018 zusätzliche Krankenhauseinweisungen in Deutschland von 39,79 je Mio. Versicherte über 65 Jahre und Hitzetag ermittelt (siehe auch Schmuker 2021). Für das Szenario SSP5/RCP8.5 (fossile Entwicklung, sehr hohe Treibhausgasemissionen, starker Temperaturanstieg) schätzen die Autoren so eine Steigerung der Zahl hitzebedingten Krankenhauseinweisungen um 85 % bis zum Jahr 2050 und um 488 % bis zum Jahr 2100 verglichen mit dem Durchschnitt in den Jahren 2009-2018. Karlsson & Ziebarth (2018) schätzen die Gesundheitsausgaben für hitzebedingte Krankenhausaufenthalte basierend auf Daten zu 170 Millionen Krankenhauseinweisungen im Zeitraum von 1999 bis 2008 auf 90.000 Euro bis 9,5 Millionen Euro pro zusätzlichem Hitzetag in Deutschland. 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 für das IPCC-Szenario A1B, was einem sechsfachen Anstieg der Krankenhauskosten 2071-2100 gegenüber 1971-2000 entspricht und insgesamt rund 1 % der gesamten Gesundheitskosten ausmacht. Das IPCC-Szenario A1B ist ein SRES-Szenario (nach Special Report on Emissions Scenarios) und wurde im Dritten und Vierten Sachstandsbericht

des IPCC verwendet. Die A1 Szenarien beschreiben eine zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Sie teilen sich in drei Gruppen, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Die Gruppe A1B beinhaltet eine ausgewogene Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energiequellen. Der Emissionspfad des A1B- Szenarios liegt leicht unterhalb des RCP8.5 Szenarios (Bildungswiki Klimawandel 2024).

Die Ergebnisse der Studie von Barrage (2023) deuten darauf hin, dass die Auswirkungen eines zusätzlichen Hitzetages auf die jährlichen öffentlichen Gesundheitsausgaben in den USA in Gebieten, die bisher nicht an Hitzeereignisse gewöhnt sind, bei bis zu 0,45 % liegen.

Es ist davon auszugehen, dass das Risiko für Hitzebelastung und die Auswirkungen auf das Gesundheitssystem 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. 2021a). Insgesamt wird in der Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland das Klimarisiko des Handlungsfeldes Gesundheit bis zur Mitte des Jahrhunderts als mittel bis hoch eingestuft, wobei dies vor allem durch die mittleren bis hohen Klimarisiken der Klimawirkungen Hitzebelastung, Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft sowie UV-bedingte Gesundheitsschäden getragen wird (Wolf et al. 2021b).

Der Kategorie **Sonstiges** sind Studien zugeordnet, die sich keinem Handlungsfeld und keiner Klimawirkung direkt zuordnen lassen, da diese **die** generellen Folgen des Klimawandels auf das globale oder nationale Wirtschaftswachstum betrachten oder die Kosten vergangener Extremereignisse darstellen.

Newman & Noy (2022) haben mit einer Methode, die auf Extremwetter-Attribution (Extreme Event Attribution, EEA) basiert, ermittelt, dass in den letzten zwanzig Jahren global von den Kosten der Extremereignissen pro Jahr 143 Milliarden US-Dollar auf den anthropogenen Klimawandel zurückzuführen sind.

Die weiteren Studien untersuchen die Folgen der Erderwärmung auf die Wirtschaftliche Entwicklung (ex-post und ex-ante) und Ungleichheit (ex-post) und zeigen einen negativen Einfluss steigender Temperaturen. Die Studien zeigen – sofern untersucht - erhebliche regionale Unterschiede, wobei die Entwicklungsländer jeweils stärker betroffen sind (de Bandt et al. 2021; Henseler & Schumacher 2019; Ferguson et al. 2020). Im Rahmen einer Literaturanalyse von Batten et al. (2020) werden folgende Wirkungsketten skizziert: langfristig steigende Durchschnittstemperaturen führen zu einem geringeren Arbeitsangebot (geringere Arbeitsproduktivität und Arbeitsfähigkeit), zu einer Verringerung der Akkumulationsrate des Produktivkapitals (permanente oder langanhaltende Schäden bzw. höhere Abschreibungsrate) und zu einer Verringerung der Wachstumsrate der totalen Faktorproduktivität (mehr Ressourcen aus FuE in Anpassung, geringere Produktivitätsgewinne, da mehr Ersatzinvestitionen).

Die ex-post Analyse von de Bandt et al. (2021) basierend auf Paneldaten, die 126 Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen im Zeitraum 1960-2017 abdecken, zeigt, dass ein Temperaturanstieg von 1°C das jährliche Wachstum des realen BIP pro Kopf um 0,74 bis 1,52 Prozentpunkte senkt, unabhängig vom Entwicklungsstand. Die steigenden Temperaturen führen dazu, dass der Anteil von privatem Konsum und Staatsausgaben am BIP steigt und der Anteil von Investitionen absinkt. Henseler & Schumacher (2019) zeigen ebenfalls einen negativen Einfluss auf das BIP und seine Komponenten, wobei die Temperatur das BIP-Wachstum pro Kopf nichtlinear in einer umgekehrt U-förmigen Beziehung beeinflusst. Dell et al. (2009) zeigen einen negativen Zusammenhang zwischen Temperatur und Einkommen für die USA, wobei ein Temperaturanstieg von 1°C eine Reduktion im Pro-Kopf-Einkommen um 1,2 - 1,9% bedeutet. Steigende Temperaturen führen zudem zu mehr Ungleichheit: Ein Anstieg der Durchschnittstemperaturen um 1°C führte über einen Zeitraum von 50 Jahren zu einem Anstieg des Gini-Koeffizienten um 4,2 bis 4,8 Punkte, wobei der Zusammenhang mit steigendem Durchschnittseinkommen (pro Kopf) schwächer wird und mit einem hohen Beschäftigungsanteil in Landwirtschaft stärker wird (Castells-Quintana & McDermott 2023). Die ex-post Analysen aus dem BMWK-Projekt „Kosten durch Klimawandelfolgen“ wurden Schäden von Extremwetterereignissen von 2000 bis 2021 in Höhe von etwa 145 Mrd. Euro ermittelt, wobei mindestens 80 Mrd. Euro auf die Periode ab 2018 entfällt. Die tatsächlichen Kosten liegen höher, da nur Ereignisse enthalten sind für die entweder im Rahmen der datenbankbasierten Recherche ein belastbarer Schadenswert zugeordnet werden konnte oder für die im Rahmen des Projektes eine eigenständige Quantifizierung erfolgte (Trenczek et al. 2022b).

Auch Studien, die eine ex-ante Betrachtung vornehmen, zeigen negative Zusammenhänge zwischen Temperaturanstieg und wirtschaftlicher Entwicklung. Die Analyse von Kahn et al. (2021) deutet darauf hin, dass zukünftig bei einem anhaltenden Anstieg der durchschnittlichen globalen Temperatur um 0,04°C pro Jahr das reale BIP pro Kopf global bis zum Jahr 2100 um mehr als 7% zurückgeht und eine Einhaltung des Pariser Abkommens mit einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 0,01°C pro Jahr den Verlust auf etwa 1% reduzieren würde. Die Studie von Barange et al. (2014) für die USA zeigt eine Erhöhung des Staatskonsums um 2,2% bis 2100, wobei Gesundheitskosten den größten Anteil ausmachen. Kotz et al. (2024b) schätzen, dass der Klimawandel, der durch vergangene Emissionen bis 2049 bereits nicht mehr zu ändern ist, das globale Einkommen permanent 19% gegenüber einer Welt ohne Klimawandel reduziert. Generell würde das Einkommen pro Kopf zwar auch mit Klimawandel immer noch steigen, aber nicht mehr so stark, wie es ohne Klimawandel hätte sein können (Kotz et al. 2024b). Dies gilt nach Angaben der Autoren nicht nur für den globalen Süden (-22%), sondern mit negativen Abweichungen von 11% auch für Nordamerika und Europa. Die ex-ante Analyse aus dem BMWK-Projekt „Kosten durch Klimawandelfolgen“ ermittelte je nach unterstellter zukünftiger Entwicklung des Klimawandels (schwach, mittel, stark) zu erwartenden kumulierten Klimafolgekosten von 280 Mrd. Euro (schwach) bzw. 910 Mrd. Euro (stark) für den Zeitraum von 2022 bis 2050, gemessen an den kumulierten Änderungen des realen BIP. Für das Jahr 2050 entspricht dies einem BIP-Verlust von 0,6% bzw. 1,8% (Flaute et al. 2022).

3.1.3 Erkenntnisse

Die Ergebnisse der Literaturanalyse zu den aktuell diskutierten zentralen Folgen und Wirkketten des Klimawandels verdeutlichen, dass manche Effekte national direkt in Deutschland entstehen und andere ihre Wirkung indirekt durch internationalen Wirkbeziehungen entfalten. Beide Einflüsse des Klimawandels – sowohl die nationalen als auch die internationalen – wirken überwiegend negativ auf das Produktionspotenzial ein. Niedrigere Arbeitsproduktivität, höhere Produktionskosten, geringere Produktionskapazitäten und niedrigere Erträge schränken das Produktionspotenzial bei fast allen Klimarisiken ein. Die international entstehenden Klimawandelfolgen liegen allerdings außerhalb des direkten nationalen Einflussbereichs, was für die Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen relevant ist (siehe Abschnitt 3.2).

Allen Klimawirkungen und Klimarisiken ist zudem gemein, dass sie durch Ungewissheit und Unsicherheiten beim Eintrittsrisiko gekennzeichnet sind. Zwar ist es sehr wahrscheinlich, dass Extremwetterereignisse wie v.a. Hitze, Dürre, Starkregen und Flusshochwasser durch den Klimawandel in Zukunft häufiger und intensiver auftreten (Brienen et al. 2020; Lange et al. 2020; IPCC 2021) und damit einhergehende Schäden zunehmen und dadurch unmittelbar auf Gesellschaft, Umwelt und die Wirtschaft Einfluss nehmen. Allerdings kann in der Literatur keine exakte Aussage über die genauen Wirkungen und die Höhe der Schäden abgeleitet werden. Hinzu kommt, dass auch innerhalb Deutschlands lokal höchst unterschiedliche Betroffenheiten vorliegen. Dies gilt großräumig, wenn man die Klimafolgen an der Küste mit denen in den Mittelgebirgen vergleicht, aber auch bereits kleinräumig, wenn man Häuser in einer Straße mit Hanglage vergleicht, von denen eines auf dem Hügel und das andere unten in der Senke gebaut wurde. Des Weiteren können viele in ihrer Wirkungsmacht nicht zu vernachlässigen Folgen des Klimawandels, wie z.B. der Verlust an Biodiversität, Kulturdenkmälern und Lebensqualität oder die steigende Zahl an Hitzetoten, nicht ausreichend bzw. überhaupt nicht monetär dargestellt werden.

Trotzdem lassen sich Richtwerte finden, mit denen Abschätzungen zu den monetarisierbaren Wirkungen des Klimawandels für Deutschland vorgenommen werden können (vgl. Flaute et al. 2022). Die Handlungsfelder und Klimawirkungen, für die auf Basis der oben ermittelten, zentralen Wirkungskanäle Parameter für spätere Szenario-Modellierungen in Arbeitspaket 3 abgeleitet werden können, umfassen die Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft, Menschliche Gesundheit, Verkehr und Verkehrsinfrastruktur sowie Fischerei. Ergänzend wird zudem das Handlungsfeld Bauwesen mit der Klimawirkung Schäden an Gebäuden durch Starkregen und Hochwasser berücksichtigt. Dies wird damit begründet, dass insbesondere bei Gebäudeschäden durch Flusshochwasser ein hohes Klimarisiko vorliegt (Voß et al. 2021) und Analysen aus Flaute et al. (2022) gezeigt haben, dass hier mit hohen Kosten zu rechnen ist.

Alle berücksichtigten Handlungsfelder und Klimawirkungen sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Diese Auswahl stellt nur die wichtigsten, monetarisierbaren Teilaspekte des Klimawandels dar und lenkt den Fokus auf die zentralen Wirkungen, mit denen in Zukunft vermehrt zu rechnen ist. Dies bedeutet aber auch, dass die folgende

Kostenabschätzung nur eine Untergrenze darstellt. Nicht monetarisierbare oder sehr unsichere, nicht klar abschätzbare Klimawirkungen werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 10: Identifizierte Handlungsfelder und Klimawirkungen zur Szenariomodellierung

Handlungsfeld	Klimasignal	Klimawirkung
Landwirtschaft	Hitze und Dürre	Ertragsausfälle
Wald- & Forstwirtschaft	Hitze und Dürre	Nutzfunktion: Holzertrag
Fischerei	Temperaturanstieg	
Wasserhaushalt & Wasserwirtschaft	Hitze, Niedrigwasser, Starkregen, Hochwasser	Grundwasserstand und Grundwasserqualität
Verkehr & Verkehrsinfrastruktur	Niedrigwasser	Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)
Industrie & Gewerbe	Hitze, Dürre, Starkregen, Hochwasser	Bedingungen auf Absatzmärkten (international)
Bauwesen	Starkregen, Hochwasser	Schäden an Gebäuden
Menschliche Gesundheit	Hitze	Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

3.2 Effekte der Anpassungsprozesse auf die Volkswirtschaft

3.2.1 Literaturübersicht

Die Analyse der Literatur zu den Effekten der Anpassungsprozesse an die Folgen des Klimawandels erfolgte (angelehnt an das Vorgehen für die Ermittlung der Klimawandel-Effekte) auf drei Arten:

1. Ausgehend von der KWRA 2021 und den bereits im Vorhaben „Kosten durch Klimawandelfolgen“ identifizierten Literaturen)
2. Mithilfe einer strukturierten Literaturanalyse in der SCOPUS-Publikationsdatenbank
3. Durch eine Ergänzung bestehender grauer Literatur aus dem deutschen und europäischen Kontext

Analyse der KWRA 2021 und der bereits im Vorhaben „Kosten durch Klimawandelfolgen“ identifizierten Literatur

Die aktuelle Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland aus dem Jahr 2021 analysiert sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels für Deutschland (siehe Kapitel 3.1.1) als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren. Für die 29 größten der insgesamt 102 untersuchten Klimawirkungen für Deutschland wurden Anpassungsmöglichkeiten identifiziert und für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts bewertet, wie sich die Anpassungsmöglichkeiten jeweils auf die Klimarisiken auswirken können und inwieweit eine Begrenzung der Auswirkungen überhaupt möglich ist (Kahlenborn et al. 2021b). Diese Priorisierung zeigt in einem ersten Schritt die Fokusbereiche der deutschen Anpassungsgestaltung auf und dient so als Ausgangspunkt einer

weiteren Recherche. Die Ergebnisse der KWRA waren auch zentraler Ausgangspunkt für die Betrachtung der volkswirtschaftlichen Implikationen flächendeckender Anpassungsmaßnahmen im Vorhaben „Kosten durch Klimawandelfolgen“. Hier wurden drei volkswirtschaftliche Entwicklungsszenarien unter den Vorzeichen des Klimawandels (leicht, mittel, stark) mit korrespondierenden Anpassungsszenarien gegenübergestellt. Die Anpassungsmaßnahmen wurden auf Grundlage von Annahmen bzw. bestehender Literatur (u.a. Tröltzsch et al. 2012) gebildet und in volkswirtschaftliche Zusammenhänge überführt. So wird bspw. im Bereich Landwirtschaft angenommen, dass eine Verdoppelung der Investitionen in neue Güter und Technologien stattfindet, um den Herausforderungen von Dürre und Trockenheit entgegenzuwirken.

Strukturierte Literaturanalyse

Für die strukturierte Literaturanalyse wurde auf die ORBIS-Datenbank als weltgrößtes Verzeichnis wissenschaftlicher Publikationen zurückgegriffen. Mithilfe eines Suchstrings in englischer Sprache (siehe Anhang) wurden verschiedene Suchbegriffe aus dem Umfeld der Klimafolgenanpassung (bspw. „climate change adaptation“) und der Volkswirtschaft (bspw. „supply“, „demand“, „capital“) miteinander kombiniert. Insgesamt konnten so 1832 Artikel als Gesamtmasse identifiziert werden, von denen jedoch nur 860 in open-access vorlagen. Zwei weitere Artikel wurden ausgeschlossen, da sie nicht auf Deutsch oder Englisch vorlagen. Von den so verbleibenden 858 Artikeln wurden weiterhin alle Artikel ausgeschlossen, die älter als 2017 waren und die weniger als 5 Zitationen besaßen. Für eine Detailanalyse verblieben somit 374 Artikel, von denen nach einer Analyse aller Abstracts bereits weitere 320 ausgeschlossen werden konnten. Die verbleibenden 54 Artikel, die als potenziell interessant gekennzeichnet wurden, wurden anschließend systematisch ausgewertet.

Ergänzung durch graue Literatur aus dem deutschen Kontext

Da die SCOPUS-Datenbank nur wissenschaftliche Publikationen aus Journals beinhaltet, nicht aber Publikationen von Verbänden, Ministerien oder anderen öffentlichen Akteur:innen, wurden im Rahmen einer ergänzenden Desktop-Recherche Artikel und Veröffentlichungen gesucht, um diese Perspektive zu ergänzen. Hier wurden 44 weitere Publikationen (bspw. vom Bundesverband Gebäudegrün, dem Umweltministerium Nordrhein-Westfalens, der European Energy Agency und weiteren Akteur:innen) identifiziert und ebenfalls systematisch ausgewertet.

3.2.2 Zentrale Wirkungskanäle

Die Literaturanalyse zeigt, dass der am häufigsten untersuchte Wirkungskanal von Anpassungsmaßnahmen die Vermeidung von klimawandelbedingten Schäden ist. Hier erfolgt in der Literatur häufig die gemeinsame Modellierung mit einem Klimawandelimpact, sodass gezeigt werden kann, inwiefern Anpassungsmaßnahmen diese modellhaft aufgetretenen Impacts verringern können. Dies geschieht häufig (aufgrund der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Limitationen) ohne eine monetäre Quantifizierung der Effekte der Anpassungsmaßnahmen über die Schadensreduktion hinaus (hierzu z.B. Dehnhardt et al. (2020) oder Posthumus et al. (2015)), vereinzelt lassen sich aber Effekte ausmachen. Die Kontextspezifität der in der Literatur untersuchten Anpassungsmaßnahmen kann dabei eine Übertragung in allgemeingültige Ableitungen von Effekten (bzw. ihrer Höhe)

erschweren (Watkiss 2022).

Bubeck et al. untersuchen beispielsweise die Effekte von Anpassungsmaßnahmen auf den deutschen Gesundheitssektor und zeigen, dass ein positiver Nutzen der Maßnahmen von bis zu 2,4 Mrd. € jährlich entstehen kann (Bubeck et al. 2020). Allerdings beschränkt sich die Analyse lediglich auf die Abwendung der klimawandelbedingt auftretenden Gesundheitskosten und quantifiziert nicht die ökonomischen Folgeeffekte, die diese mit sich bringt (bspw. eine Verringerung des Rückgangs des Arbeitskräfteangebots, die Erhöhung der Produktivität, die Steigerung von Haushaltseinkommen o.ä.). Diese Limitation findet sich in zahlreichen weiteren Publikationen (bspw. von Zou et al. (2013) für den Sektor Landwirtschaft und von Diaz (2016) für den Sektor Küstenschutz).

Mit Flaute et al. (2022) besteht mit dem Abschlussbericht zum Vorhaben „Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland“ zum ersten Mal eine Untersuchung, die die Grenzen der ökonomischen Anpassung in Deutschland in Abhängigkeit vom eintretenden Klimawandel benennt. Können in einem schwachen Klimawandel Szenario bis 2050 noch alle Schäden entlang der acht Klimawirkungen

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

durch Anpassungsmaßnahmen ausgeglichen werden, so beträgt der Anteil im mittleren Klimawandel nur noch 80 bzw. im starken Klimawandel sogar nur noch 60%. Die zugrunde gelegten Anpassungsmaßnahmen speisen sich in Flaute et al. allerdings aus einem Rahmen ohne direkten Bezug auf bestehende Aktionspläne oder den Politikrahmen zur Anpassung in Deutschland. Außerdem liegt den Untersuchungen ein stark annahmenbasiertes Anpassungsszenario zugrunde, dessen Parameter unabhängig von der Intensität des eintretenden Klimawandels bestimmt wurden.

Zwei Quellen, die sich besonders intensiv mit den Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen im deutschen Kontext auseinandergesetzt haben, sind Dehnhardt et al. (2008) und Tröltzsch et al. (2012). In Dehnhardt et al. (2008) werden verschiedene Hochwasserschutzmaßnahmen (Deicherhöhungen, Deichrückverlegungen) auf ihre Kosten und ihre Schadensreduktionswirkung hin untersucht, die in Abhängigkeit der detaillierten Maßnahmenart von 1:0,24 (Kosten über die Lebensdauer der Maßnahme sind ca. viermal höher als die vermiedenen Schäden) bis zu 1:1,96 (Kosten über die Lebensdauer der Maßnahme sind nur halb so hoch wie die vermiedenen Schäden) reichen. In Tröltzsch et al. (2012) werden insgesamt 28 Maßnahmen aus insgesamt 13 Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie im Detail untersucht, mit szenarienbasierten Kostenschätzungen (Investitions- und Instandhaltungskosten unterlegt). Eine Auswertung

zeigt, dass insbesondere informierende Maßnahmen (bspw. ein Hitzewarnsystem oder die Einrichtung einer Plattform für Unternehmen zur Information über Klimafolgenanpassung) ein besonders positives Kosten-Nutzen-Verhältnis besitzen. Vergleichsweise geringe Nutzeneffekte sind dagegen von Maßnahmen zur bodenschonenden Bewirtschaftung sowie von der Anpassung des Stromleitungsnetzes an Extremereignisse zu erwarten. Tröltzsch et al. erkennen aber auch selbst die bereits mehrfach erwähnte Kontextspezifität (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.1) ihrer Untersuchungen an, die ggf. die Aussagekraft der Ergebnisse beeinflussen kann.

Eine ausführliche Literaturanalyse zu den ökonomischen Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen kommt darüber hinaus von Campagnolo et al. (2023). Dieses Paper ist darüber hinaus eines der wenigen, das die dem vorliegenden Forschungsvorhaben zugrundeliegende Prämisse der integrierten Betrachtung von Klimawandel, Klimaschutz und Klimaanpassung ebenfalls verfolgt. Hier werden sowohl Veränderungen des Ausgabenverhaltens von Haushalten, sowie Wertveränderungen bzw. werterhaltende Maßnahmen untersucht und teilweise durch eigene Modellierungen ergänzt. Randazzo et al. (2020) quantifizierten bereits 2020 die Auswirkungen von Klimaanlage auf die Energiekosten bzw. -ausgaben von Haushalten. Haushalte, die sich durch Klimaanlage an hohe Temperaturen anpassen, geben im Durchschnitt 42 % mehr für Strom aus als Haushalte, die sich nicht für diese Lösung entscheiden. Darüber hinaus konnte für Italien ein Zusammenhang zwischen der geografischen Lage und den Ausgaben für Energie festgestellt werden: Der Anteil des Einkommens, der für Strom ausgegeben wird, variiert hier zwischen 1,8 % in den kühleren und 3,5 % in heißeren Regionen.

Campagnolo et al. (2023) stellten basierend auf diesen Ergebnissen fest, dass eine Erhöhung der Anzahl von Cooling Degree Days (CDD - Tagen, an denen aktiv gekühlt werden muss) um 100 Einheiten die gesamten Stromausgaben von Haushalten um 1,1 % erhöht, gleichzeitig aber die Ausgaben für Gas um 9,1 % senkt (da auch an weniger Tagen geheizt werden muss). Der Gesamteffekt der CDDs auf die Energieausgaben ist dabei auch nach Einkommensschichten unterschiedlich: Die Energieausgaben steigen prozentual für arme Haushalte um 0,6 % an und sinken aber für die mittleren und reichen Haushalte (-2,2 % und -1,7 %).

Darüber hinaus untersuchten Campagnolo et al. (2023) auch das Zusammenspiel zwischen privatwirtschaftlichen und staatlich unterstützten Extremwetterversicherungen: In rein marktorientierten Versicherungssystemen werden die Versicherungsprämien nach dem Risiko festgelegt. Steigt durch den Klimawandel das Risiko einer Überschwemmung, kann dies den kommerziellen Versicherungsmarkt unattraktiv machen bzw. zu einer massiven Verteuerung bestehender Verträge führen. Ein Rückgang der Versicherungsabdeckung, vor allem in Bevölkerungsschichten mit geringem verfügbarem Haushaltseinkommen, ist paradoxerweise die Folge. Eine staatlich unterstützte Versicherung mit geringeren Prämien als Anpassungsmaßnahme hilft daher, der Verteuerung von Prämien entgegenzuwirken und kann Haushalte entlasten. Ergebnisse von Hudson et al. (2019) zeigten bspw. dass sich die durchschnittliche risikobasierte Hochwasserversicherungsprämie (auf dem freien, nicht staatlich geregelten Markt) zwischen 2015 und 2055 verdoppeln könnte.

Ein Sektor, in dem eine Vielzahl an Untersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen

der Anpassungsmaßnahmen identifiziert werden konnte, ist die Landwirtschaft. So zeigen z.B. Moore & Lobell (2014), dass ein klimawandelbedingt modellierter Rückgang der Gerstenenerträge von 22% durch Anpassungsmaßnahmen auf 15% reduziert werden kann – und bei Mais die Verluste sogar von ca. 9% auf unter 1% sinken könnten. Insgesamt würden so die durchschnittlichen landwirtschaftlichen Gewinne aller landwirtschaftlichen Produkte in Europa durch die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen um 1,5% steigen, ohne Anpassung jedoch um 2,3% sinken. Ähnliche Ergebnisse lassen sich Balkovič, Juraj, et al. (2015) entnehmen: Unter den Vorzeichen eines 2°C-Wandelszenarios hätte der Klimawandel bis Mitte des Jahrhunderts bei Einbeziehung von Anpassungsmaßnahmen eine positive monetäre Gesamtauswirkung auf landnutzungsbezogene Sektoren in Europa in Höhe von +0,56 Mrd. USD/Jahr, während ohne Anpassungsmaßnahmen ein Verlust von 1,96 bis 6,95 Mrd. USD/Jahr zu verzeichnen wäre.

Alves et al. (2019) befassen sich intensiv mit den positiven Nebeneffekten von grün-blauen Infrastrukturen zur Überflutungsvorsorge (bspw. Gründächern oder anderen naturnah geplanten Anlagen, die dazu dienen, Wasser zu versickern oder zu speichern, um Überflutungen zu verhindern). Je eingebautem Quadratmeter Gründach mit integriertem Regenwasserauffangbecken können so von privaten Haushalten je nach Nutzungsart Ausgaben für (Ab)wasserkosten und Energie um bis zu 2,82 € pro m² Gründach gesenkt werden. Der bereits oben in Campagnolo et al. (2023) beschriebene Zusammenhang zwischen erhöhten Energieausgaben für Kühlung infolge der Installation einer Klimaanlage kann ebenfalls durch ein Gründach gesenkt werden. Alves et al. (2019) zufolge liegt die Höhe dieses Effekts bei ca. 1,61€/m²/Jahr. Neben den zusätzlichen Ökosystemleistungen des Gründachs (Steigerung der Luftqualität und Bindung von Schadstoffen und Treibhausgasen) wird auch festgestellt, dass Gründächer die Lebensdauer eines Dachs verbessern. Somit fallen für einen Haushalt laut Alves et al. (2019) verringerte Investitionskosten von 108 € je m² Dachfläche über einen Zeitraum von 20 Jahren an.

Generell lässt sich aus der Literatur ableiten, dass mit einer stärkeren Erwärmung aufgrund des Klimawandels der Finanzierungsbedarf von transformativen Anpassungsmaßnahmen steigen wird. Für private Haushalte, aber auch Unternehmen geht dies mit einem erhöhten Kapitalbedarf (Eigenkapital, Fremdkapital, bzw. Darlehen oder Zuschüsse) einher.

3.2.3 Erkenntnisse

Die Auswertung der Literatur zeigt, dass häufig der Begriff Klimaanpassung noch mit der reinen Vermeidung von Schäden in Verbindung gebracht wird. Damit zusammenhängend wird in der Literatur vor allem der Kosten-Nutzen-Effekt von spezifischen Einzelmaßnahmen untersucht. Eine Bewertung von mehreren Maßnahmen als Maßnahmenpaket auf nationaler Ebene und ihre Einordnung hinsichtlich volkswirtschaftlicher Effekte findet eher selten statt. Dies liegt insbesondere daran, dass Klimawandelfolgen lokal sehr unterschiedlich ausfallen können und daher regional zugeschnittener Anpassungsmaßnahmen bedürfen. Daher ist die Bewertung der ökonomischen Wirkungen von spezifischen Klimaanpassungsinvestitionen sowie die Einordnung der Schadensvermeidung durch Anpassungsmaßnahmen im jeweiligen Kontext von Angebot, Nachfrage, Einkommen oder Produktionspotenzial bisher kaum Gegenstand von Studien. Darüber

hinaus sind alle ausgewerteten Studien modellbasiert und aus der ex-ante-Perspektive formuliert als kontrafaktische Szenarien für ein konkretes Klimawandelereignis für eine bestimmte Region bzw. einen bestimmten Regionstyp unter Verwendung eines spezifischen Modells mit Annahmen zu Stärke des Klimawandels und dem untersuchten Zeitraum. Dies erschwert die Übertragbarkeit spezifischer Modellergebnisse bestimmter regional getätigter Einzelmaßnahmen auf eine deutschlandweit allgemeingültige Ebene, d.h. es lassen sich nur selten bzw. schwer allgemeingültige Effekte von Klimaanpassungsmaßnahmen aus der Literatur ableiten.

Die Literaturanalyse zeigt ebenfalls, dass ein Übergewicht an Untersuchungen in drei Handlungsfeldern der deutschen Anpassungsstrategie vorliegt: Gesundheit, Landwirtschaft, Küstenschutz – während bspw. zum Handlungsfeld Forstwirtschaft keine verlässlich quantifizierbare Quelle identifiziert werden konnte. In den Handlungsfeldern Landwirtschaft sowie Gesundheit steht vor allem die Quantifizierung der Effekte von Anpassungsmaßnahmen an Hitze und Dürre im Vordergrund, während im Küstenschutz das Thema Hochwasser bzw. Überflutungen naturgemäß die wichtigste Rolle spielt.

Darüber hinaus liegt ein Fokus dieser Untersuchungen meist auf der Untersuchung der Klimawandel- bzw. der Anpassungsimplicationen auf gesamtsstaatlicher oder gesamtwirtschaftlicher Ebene. Bedeutendste Metrik sind hier die Einflüsse der Anpassungsmaßnahmen auf das BIP. Nur selten werden die Anpassungskosten oder -nutzen für private Haushalte bestimmt. Hier besteht, auch vor dem Hintergrund einer höchst individuellen Entscheidungsfindung zur Anpassung an die Klimawandelfolgen, weiterer Forschungsbedarf.

3.3 Wirkung der Transformationsprozesse (Klimaschutz) auf die Volkswirtschaft

Im Folgenden werden die Effekte des Klimaschutzes und der damit verbundenen Transformationsprozesse auf Wirtschaft, Wertschöpfung und Produktionspotenzial dargestellt.

3.3.1 Grundlegende Wirkungskanäle von Klimaschutz

Klimaschutz muss die Emissionen von Treibhausgasen (THG) senken. Bis zum Jahr 2030 sollen die THG-Emissionen in Deutschland gemäß Klimaschutzgesetz um 65 % unter dem Niveau von 1990 liegen. Im Jahr 2022 waren es 40,4 % (UBA 2024b). Klimaschutzmaßnahmen erfolgen in Deutschland im Wesentlichen durch den Einsatz THG-freier Technologien oder die effizientere Nutzung von Energie. Da die THG-Emissionen überwiegend bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen, konzentriert sich der Klimaschutz auf ihre Substitution durch erneuerbare Energien oder Strom und weitere Energieträger wie Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe, die über erneuerbare Energien erzeugt werden. Außerdem trägt eine erhöhte Energieeffizienz zum Klimaschutz bei. Auch wenn diese Säule der Energiewende in der öffentlichen Debatte oft weniger berücksichtigt wird, gibt es gute Gründe für das Prinzip „efficiency first“, wie dies z. B. im Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016) festgehalten ist. Jede eingesparte Energieeinheit muss nicht erzeugt werden. Daneben spielen prozessbedingte Emissionen in ausgewählten Industriesektoren wie Stahl-, Zement- und chemischer Industrie eine Rolle, für

die teils auch die Abscheidung von CO₂ (carbon capture) längerfristig als Option gesehen wird. In der Land- und Abfallwirtschaft, auf die im Folgenden nicht weiter eingegangen wird, geht es vor allem um die Reduzierung bestimmter THG-intensiver Prozesse.

Die Betrachtung konzentriert sich im Folgenden auf die Energiewende in Form von Investitionen in den Ausbau der erneuerbaren Energien und der Steigerung der Energieeffizienz, bezieht aber auch weitere Vermeidungstechnologien wie Wasserstoff, PtX und CCS mit ein. Zwar ist eine Senkung der THG-Emissionen auch durch Verhaltensanpassungen möglich, deren Bedeutung für das Erreichen ambitionierter Klimaschutzziele zunehmend etwa von der IEA (2023) betont wird und die teilweise ohne Investitionen möglich sind. Allerdings ist davon auszugehen, dass für den größten Teil der Energiewende bzw. der Erreichung der Klimaschutzziele Investitionen in den Kapitalstock notwendig sind. Denn Produktionsprozesse und Konsumaktivitäten mit Energieeinsatz sind kurzfristig weitgehend limitational, d. h., dass zum Erzeugen einer bestimmten Einheit eines Produkts, zur Beheizung eines Gebäudes oder Nutzung eines Fahrzeugs ein bestimmter Energieträger in einem weitgehend festen Verhältnis eingesetzt werden muss (Gemeinschaftsdiagnose 2023; Bönke et al. 2023). Kurzfristig bleibt als Reaktionsmöglichkeit auf z. B. Preisschocks wie im Frühjahr 2022 meist nur die Reduktion der Produktionsmenge oder in Ausnahmefällen der Wechsel auf andere Energieträger, wenn dies technisch direkt möglich ist. Allerdings bedeutet Limitationalität auf der Ebene einzelner Anlagen nicht, dass dies auf der Ebene von Wirtschaftsbereichen oder der Gesamtwirtschaft auch gilt. Innerhalb eines Wirtschaftsbereichs sind die Reaktionsmöglichkeiten größer, weil Anlagen mit unterschiedlicher Energieeffizienz und unterschiedlicher Energieträgerstruktur zumindest eingeschränkt Substitute sind. Die Energienachfrage auf Ebene von Wirtschaftsbereichen ist deshalb preisunelastisch, aber deutlich größer als Null (Labandeira et al. 2017). Die Wirtschaftlichkeit von Ersatzinvestitionen ist stark vom Alter des Kapitalstocks abhängig. Wenn ohnehin ein Ersatz ansteht, ist der Umstieg sehr viel günstiger, als wenn Anlagen oder Fahrzeuge vor Ende ihrer Lebenszeit ersetzt werden müssen. Investitionen in Energieeffizienz führen dazu, dass weniger Energie pro Produktionseinheit eingesetzt werden muss. Investitionen in erneuerbare Energien oder darauf basierende Energieträger wie Wasserstoff oder Power-to-X (PtX) setzen voraus, dass auch die Infrastruktur für deren Bereitstellung aufgebaut wird.

In einer früheren eigenen Zusammenstellung wurden sieben Effekte der Energiewende unterschieden, die grundsätzlich gesamtwirtschaftlich positiv wie negativ wirken können (Lutz & Breitschopf 2016). Ausgangspunkt ist der Investitionseffekt, positiv in Form von Investitionen in erneuerbare Energien oder Energieeffizienz, negativ in Form verringerter Investitionen in bisherige Technologien. Vor allem bei den erneuerbaren Energien stellen Betrieb und Wartung über die Laufzeit der Anlagen weitere wirtschaftlich relevante Aktivitäten dar. Die Investitionen in Energiewendetechnologien führen zu einer Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energieträger oder Strom bzw. strom-basierte Energieträger sowie einen verringerten Energiebedarf. In der Regel benötigen bestimmte Prozesse durch technischen Fortschritt immer weniger Energie (Gemeinschaftsdiagnose 2023). Allerdings kann bei einzelnen Prozessen der Energieträgerwechsel auch mit einer geringeren Energieeffizienz verbunden sein, wenn andere Technologien weniger effizient sind. Die Beispiele Elektromobilität und Wärmepumpe verdeutlichen die Möglichkeit von Sprüngen der Endenergieeffizienz bei neuen

Technologien. Sie benötigen sehr viel weniger Endenergie als fossile Fahrzeuge und Heizungen, allerdings in Form des bereits veredelten Sekundärenergieträgers Strom.

Durch die Energiewende treten Preiseffekte auf, wenn Energiewendetechnologien teurer sind als die bisherigen Technologien. Die Kapitalkosten für Unternehmen und private Haushalte steigen dann. Die CO₂-Bepreisung macht Energiewendetechnologien einzelwirtschaftlich attraktiver, muss aber von den Emittenten getragen werden und erhöht deren Kosten. Positive Effekte können durch die Verwendung der Einnahmen ausgelöst werden. Darüber hinaus gibt es weitere Effekte auf Einkommen, Außenhandel sowie dynamische Effekte, die von den oben genannten Effekten ausgelöst werden. Darunter fallen sich teils selbst verstärkende Prozesse wie Multiplikator-, Lern-, Markt- und Produktivitätseffekte. Ihre Quantifizierung ist letztlich nur noch in einem gesamtwirtschaftlichen Modell möglich. Die Effekte und die volkswirtschaftliche Gesamtwirkung sind von Technologien, Märkten, Innovationen und der Erwartungsbildung abhängig. So sind für marktreife erneuerbare Erzeugungstechnologien wie PV und Wind globale Lernkurveneffekte sehr wichtig. Auf dem Strommarkt führen sie zu zunehmenden Phasen, in denen die Grenzkosten der Erzeugung (nahe) Null sind.

Tabelle 11: Überblick über zusätzliche ausgelöste („positive“) und gegenläufige/vermiedene („negative“) Effekte der Energiewende (EW)

	Wirkung	Positive Effekte	Negative Effekte
<i>Investitionseffekte</i>	Direkt, indirekt	Investitionen in Energiewende	Vermiedene Investitionen in bisherige Technologien
<i>Effekte durch Betrieb und Wartung</i>	Direkt, indirekt	Effekte durch Betrieb und Wartung von EW-Anlagen	Effekte durch vermiedenen Betrieb und Wartung bisheriger Anlagen
<i>Substitutionseffekte/ Einspareffekte</i>	Indirekt, induziert	Effekte durch verringerten Einsatz fossiler Energieträger	Effekte durch verringerten Einsatz fossiler Energieträger
<i>Preiseffekte</i>	Direkt, indirekt, induziert	Sinkende Preise durch EW	Höhere Preise durch EW; Budgeteffekt, Kosteneffekt
<i>Einkommenseffekte</i>	Induziert	Effekte durch höhere Einkommen durch EW	Effekte durch niedrigere Einkommen durch EW
<i>Außenhandelseffekte</i>	Induziert	Höhere Exporte von EW-Gütern und -Dienstleistungen	Reduzierte Exporte konventioneller Technologien
<i>Dynamische Effekte</i>	Induziert	Sich selbst verstärkende Effekte: Multiplikator-, Lern-, Markt-, Produktivitätseffekte	

Quelle: Lutz & Breitschopf (2016)

Verteilungseffekte lassen sich für viele unterschiedliche Akteure, Märkte und Wirkungen darstellen. Die Spanne dieser Be- und Entlastungen ist größer als die der gesamtwirtschaftlichen Effekte. Im Gegensatz zu den gesamtwirtschaftlichen Effekten ist eine übergreifende oder zusammenfassende Gesamtbetrachtung von Verteilungseffekten nicht möglich (Lutz & Breitschopf 2016).

Die Studie von Fragkiadakis et al. (2022) für die EU-Kommission zur Wirkung von Klimapolitik auf Wachstumsdeterminanten untersucht die Frage, ob Energie als bisher wenig beachteter Produktionsfaktor als Treiber für wirtschaftliches Wachstum

identifiziert werden kann. Die Ergebnisse unterschiedlicher Analysemethoden sind gemischt: Einerseits unterstützen die Autoren mit einer Zeitreihenanalyse die Neutralitätshypothese, die besagt, dass Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum in keinem kausalen Zusammenhang zueinander stehen. Andererseits finden sie mit einer Paneldaten-Analyse Belege für die Wachstumstheorie in einzelnen Ländern, nach der der Energieverbrauch eine positive Wirkung auf die wirtschaftliche Entwicklung hat. Dies gilt insbesondere für Wirtschaftszweige, die stark von Energie abhängig sind, wie die Chemie- oder Kunststoffindustrie. Darüber hinaus kommen die Autoren in der Studie zu dem Ergebnis, dass eine schwache Substituierbarkeit zwischen Energie einerseits und Arbeit und Kapital andererseits besteht, deren Elastizität über die Zeit konstant ist.

Die Europäische Zentralbank (ECB 2023) betrachtet die Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen und den dadurch ausgelösten ökologischen Wandel auf die Komponenten des Produktionspotenzials. Danach können Klimaschutzmaßnahmen zu „stranded assets“ führen, also den produktiven Kapitalstock reduzieren, wenn Maschinen, Anlagen oder Gebäude, die mit fossilen Energien betrieben werden, vorzeitig entwertet werden. Höhere Energiekosten durch eine CO₂-Bepreisung oder vergleichbare Instrumente können die Mittel von Unternehmen und Haushalten für Investitionen reduzieren. Die Produktivität steigt zugleich durch höhere Klimaschutzinvestitionen, die durch die höheren CO₂-Preise rentabler werden.

Bei Arbeitskräften kann ein Mismatch von benötigten Qualifikationen im grünen Wandel und vorhandenem Arbeitsangebot zu einer Erhöhung struktureller Arbeitslosigkeit führen. Bei der totalen Faktorproduktivität kommt es aus Sicht der EZB vor allem auf die relative Produktivität zwischen wachsenden (grünen) und schrumpfenden (braunen) Sektoren bzw. Unternehmen an. Letztlich sind erfolgreiche Innovationen in klimafreundlichen Technologien, die ebenso effizient oder effizienter als die CO₂-intensiven sind, entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg des Klimaschutzes. Außerdem senkt die grüne Transformation die negative Wirkung von Angebotsschocks wie dem starken Energiepreisanstieg im Jahr 2022. Der Wandel führt zu einer strukturellen Transformation der Volkswirtschaft, deren gesamtwirtschaftliches Ergebnis offen ist. Dabei geht die EZB davon aus, dass ein möglichst geordneter vorhersehbarer Wandel zu weniger stranded assets und Zusatzkosten führt. Darüber hinaus beeinflussen marktwirtschaftliche Eingriffe die Firmen am wenigsten.

Ähnlich fällt die Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimaschutzes der Bundesbank (2022) aus: Sie sieht sowohl angebots- als auch nachfrageseitige Risiken der Klimaschutzpolitik. Direkte Kosten durch die Emissionsbepreisung, höhere Preise emissionsintensiver Vorleistungen, Kosten zur Emissionsvermeidung und Produktionsanpassung sowie die Neubepreisung von Vermögenswerten werden als mögliche Auswirkungen auf der Angebotsseite aufgeführt. Bei den Nachfrager:innen belasten höhere Energiekosten die Budgets und senken damit Konsum und Investitionen. Umgekehrt können Investitionsanreize, Transfers der Bepreisungseinnahmen und zusätzliche öffentliche Investitionen die gesamtwirtschaftliche Nachfrage erhöhen. Dabei betonen die Autoren die Bedeutung der Berechenbarkeit der Klimaschutzpolitik für die gesamtwirtschaftlichen Ergebnisse. Auch die Klimapolitik in anderen Ländern spielt eine wichtige Rolle. Bei einseitigem Klimaschutz drohen Verlagerungseffekte, während internationale Kooperation negative Effekte verringert. Nicht zuletzt wird darauf verwiesen, dass einzelne

Wirtschaftszweige von Klimapolitik unterschiedlich betroffen sind, weshalb multisektorale Modelle gegenüber unisektoralen Makromodellen für die Analyse vorzuziehen sind.

Eine Studie für das Netzwerk für ein grüneres Finanzsystem (NGFS 2022) benennt folgende Transmissionskanäle auf der Makroebene, die sowohl durch physische Risiken des Klimawandels als auch durch Risiken bei der Gestaltung der Transformation, d. h. insbesondere der Klimaschutzpolitik, auftreten können:

- Entwertung des Kapitalstocks und erhöhte Investitionen,
- Preisverschiebungen durch strukturelle Änderungen,
- Änderungen der Produktivität,
- Friktionen am Arbeitsmarkt,
- sozio-ökonomische Änderungen und
- sonstige Wirkungen auf den internationalen Handel, Einnahmen, fiskalische Spielräume, Produktion, Zinsen und Wechselkurse.

Analysen der OECD (2021a) für den Zeitraum 1995 bis 2015 in einer länderübergreifenden Analyse für alle OECD Länder zeigen, dass eine stringenter Umweltpolitik in der Vergangenheit die gesamtwirtschaftliche Entwicklung insgesamt nicht deutlich negativ beeinflusst hat, wobei sich zwischen einzelnen Unternehmenskategorien Unterschiede zeigen. Ein unilateraler Anstieg der Energiepreise um 10 %, z. B. durch einen höheren CO₂-Preis, hat die Energie- und CO₂-Intensität in diesem Zeitraum zwischen 5 und 10 % reduziert. Dies ist das Ergebnis aus verschiedenen Studien der OECD zu einzelnen Ländern, der in einzelnen Ländern etwas unterschiedlich ausgefallen ist und nicht auf beliebig hohe Preissteigerungen übertragbar ist. Die wirtschaftlichen Wirkungen sind demnach deutlich kleiner. So liegt die Beschäftigung um weniger als 1 % niedriger, was insbesondere auf energieintensive Unternehmen mit niedrigerer Produktivität zurückgeht. Während auch die heimischen Investitionen leicht zurückgehen und Auslandsinvestitionen um 1,5 % steigen, ist auch ein leichter Anstieg der Produktivität zu beobachten.

Köberle et al. (2021) führen drei Wirkungskanäle an, die zu positiven gesamtwirtschaftlichen Effekten von Klimaschutz führen können, wenn reale Abweichungen vom Optimum berücksichtigt werden: die Einbeziehung vermiedener Schäden (1.) und von Co-Benefits (2.) wie verringerte Luftschadstoffemissionen und verbesserte Gesundheit der Klimaschutzpolitik sowie die Berücksichtigung von Second-best-Lösungen im jeweiligen Referenzszenario (3.) wie z.B. niedrige F&E-Ausgaben oder Investitionen, die ggf. durch klimapolitische Instrumente korrigiert werden. Sie argumentieren also für einen Ansatz, der nicht bereits ein optimales Gleichgewicht in der Referenzentwicklung unterstellt und die Wirkungen von Klimaschutz ausreichend differenziert betrachtet. Dazu ist auch eine ausreichende Auflösung der sozio-ökonomischen Verzerrungen und Unvollkommenheiten nötig. Nach ihrer Analyse werden diese Wirkungskanäle in den meisten Impact Assessment Modellen (IAM) nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt.

Auch die aktuelle Gemeinschaftsdiagnose (Gemeinschaftsdiagnose 2023) beschäftigt sich mit den Transmissionsmechanismen der Klimaschutzpolitik. Sie benennt einen einheitlichen CO₂-Preis als bestes Instrument der Klimapolitik, das durch FuE-Förderung im weiteren Sinne, um mehr und produktivere Investitionen in Klimaschutz anzuregen,

sowie ein Klimageld für den sozialen Ausgleich ergänzt werden sollte. Wenn die zusätzlichen Investitionen in den Klimaschutz andere Investitionen verdrängen, führt Klimaschutzpolitik zu einem negativen Effekt auf das BIP. Ein deutlicher Anstieg der gesamtwirtschaftlichen Investitionen im Fall des Klimaschutzes zu Lasten des Konsums könnte aber auch zu einem positiven gesamtwirtschaftlichen Effekt führen. Annahmen über die Substitutionselastizitäten zwischen Energie und Arbeit/Kapital spielen dafür ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Untersuchung geht intensiv auf die Rolle der Investitionen für den Klimaschutz ein. Pro Jahr müssen nach einer Literaturrecherche von Burret et al. (2021) zwischen 43 und 82 Mrd. Euro für den Klimaschutz investiert werden, wobei vier von fünf betrachteten Studien in einer Spanne von 43 bis 58 Mrd. Euro jährlich liegen. Die Zahlen in Abbildung 5 liegen zwischen 2026 und 2035 sogar noch höher im Bereich von 70 Mrd. Euro. Ein großer Teil davon wird für die Energiewirtschaft und den Gebäudesektor benötigt. Aber gerade für die energieintensive Industrie liegen die jährlichen Gesamtinvestitionen nur bei 17 bis 20 Mrd. Euro, von denen bisher weniger als 1,5 % explizite Klimaschutzinvestitionen sind (Gemeinschaftsdiagnose 2023). Die notwendigen Investitionen können gerade für die energieintensive Industrie einen Großteil der gesamten Investitionen ausmachen.

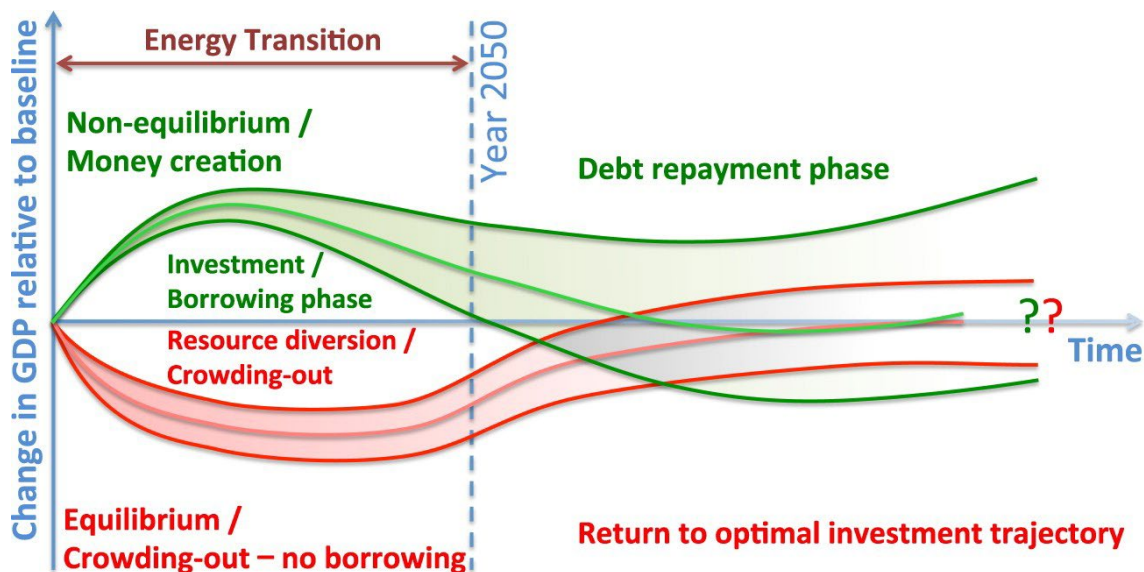
Die Analyse von Burret et al. (2021) beschäftigt sich zudem intensiv mit den für die Transformation notwendigen Investitionen und einem möglichen Crowding-out. Danach sind deutliche Mehrinvestitionen möglich und sie sind realwirtschaftlich durch heimische Produktion oder Importe darstellbar.

Eine Analyse des IMF (Espagne et al. 2023) konzentriert sich auf die möglichen internationalen Effekte von Klimaschutz (siehe Abbildung 27). Während die exportierenden Länder) fossiler Energieträger mit negativen gesamtwirtschaftlichen Effekten rechnen müssen, profitieren die Importeure fossiler Energien sowie die Exportländer kritischer Mineralien, die für die Energiewende in großem Umfang benötigt werden. Daneben kommt es auch auf die Verteilung der Produktion der Energiewendegüter an. Ihre Produzenten und Exporteure profitieren, während die Situation für Importeure von Energiewendegütern und fossilen Energieträgern offen ist. Wichtig ist dabei, dass einzelne Länder überdurchschnittlich von einer globalen Energiewende profitieren oder betroffen sein können. Mögliche höhere Investitionen, höhere Inflation, Veränderungen in den Handelsströmen, Wechselkursen und Zinssätzen, die dann wiederum die Realwirtschaft beeinflussen, beschreiben sehr komplexe Zusammenhänge, die sich auch durch unterschiedliche Transformationsgeschwindigkeiten der wichtigen Wirtschaftsräume ändern können.

die Klimaschutzinvestitionen zusätzlich sind und in welchem Umfang die Energiewende zu zusätzlichen Abgängen beim fossilen Kapitalstock führt.

Dabei ist offen, ob das BIP höher oder niedriger liegt als im Referenzpfad. Natürlich ist die Übersicht in Abbildung 28 stark vereinfachend, zumal die Autoren selbst darauf hinweisen, dass sich angebots- und nachfrageseitige Modelle teilweise annähern und sich durch Änderung von Annahmen selbst bei Nutzung eines Modells die Vorzeichen ändern können. Unter anderem spielt die Verwendung der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung, die meist als Proxy für die Klimaschutzpolitik insgesamt dient, eine wichtige Rolle.

Abbildung 28: Wirkung von Klimaschutzpolitik in Modellen mit unterschiedlichen Modellphilosophien



Quelle: Mercure et al. (2019, S. 1028)

In der Literatur gibt es verschiedene Klassifizierungen, nach denen Modelle, die die Bereiche Wirtschaft, Energie und Klima kombinieren, unterteilt werden können. Ein Beitrag von Nikas et al. (2019) unterteilt die Modelle in fünf Kategorien, wobei drei für die folgende Betrachtung interessant sind, und stützt sich dabei auf eine detaillierte Literaturübersicht:

1. Wachstumsmodelle, die die Wirtschaft als einen Sektor darstellen und die Wohlfahrt langfristig maximieren. Die Autoren nennen diese Modelle „optimal growth (or welfare optimisation) Integrated Assessment Modelle (IAMs)“.
2. Berechenbare allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE) mit einer detaillierteren Darstellung der Wirtschaft mit mehreren Sektoren. Sie untersuchen die Auswirkungen bestimmter politischer Maßnahmen auf wirtschaftliche, soziale und ökologische Parameter unter der Annahme, dass sich Wirtschaftssubjekte optimierend verhalten und sich die Märkte klären und kurzfristig ein Gleichgewicht erreichen.
3. Makroökometrische Modelle separieren wie CGE-Modelle verschiedene Industriesektoren und greifen auf vergleichbare Datenquellen zurück. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass sie historische Daten und ökonometrisch geschätzte Parameter und Beziehungen verwenden und dass sie keine

Gleichgewichte betrachten. Sie sind im Vergleich zu 1) und 2) stärker nachfrageorientiert.

4. Partialmodelle einschließlich Energiesystemmodelle liefern eine detaillierte Analyse der Wechselwirkung zwischen Umweltauswirkungen und einem bestimmten Wirtschaftssektor. Sie werden in der Regel zur Bewertung potenzieller klimabedingter Schäden oder zur Bestimmung zum Klimaschutz notwendiger technischer Anpassungen in einem bestimmten Wirtschaftssektor verwendet. Oft werden ihre Ergebnisse als Inputs in CGE- oder makroökonomischen Modellen genutzt. Partialmodelle und Energiesystemmodelle als eine Untergruppe beschreiben Nikas et al. (2019) separat.
5. Andere IAMs beziehen sich auf Modelle, die nur wenig gemeinsam haben, außer dass sie in keine der vorhergehenden bekannten Gruppen passen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist, dass sie die Wirtschaft in einer stark "reduzierten Form" modellieren oder einfach exogene Wachstumsszenarien verwenden (überhaupt kein Modell). Obwohl sie sich deutlich voneinander unterscheiden, sind sie alle tendenziell stärker politikorientiert als die Modelle der anderen vier Kategorien.

Ähnlich unterscheiden Colmenares et al. (2020) Wachstumsmodelle, ökonometrische Studien, d. h. Schätzung von historischen Zusammenhängen ex post einschließlich makroökonomischer Modelle (ex ante), Simulationsstudien einschließlich CGE-Modelle und integrierte Bewertungsmodelle (IAMs). Ein früher Vergleich zwischen CGE- und makroökonomischen Modellen findet sich in West (1995). Die Verwendung verschiedener Modelltypen zur Erfassung der Auswirkungen von Energieeffizienzverbesserungen wird in IEA (2013) vorgestellt. Dynamische Stochastische Gleichgewichtsmodelle (DSGE) wie das Modell "EMuSe" der Bundesbank (Hinterlang et al. 2023) können als Untergruppe der CGE-Modelle betrachtet werden, die typischer Weise keine oder nur wenige Sektoren unterscheiden.

Aufgrund der unterschiedlichen Systemzusammenhänge bieten sich für die detaillierte Erfassung der Energiemärkte andere (Bottom-up) Modelle an als für die Gesamtwirtschaft, die den Strommarkt oder die Klimaschutzaktivitäten im Gebäudesektor detailliert abbilden. Zu sozio-ökonomischen Effekten liegen etwa im Rahmen der Langfristszenarien²² oder der nationalen Energie- und Klimaschutzpläne (Kemmler et al. 2021) vielfältige Erkenntnisse vor. Der Green Deal ist auf EU-Ebene von umfangreichen Impact Assessments mit verschiedenen Modellen begleitet worden, einem makroökonomischen (E3ME), einem CGE- (GEM-E3) und einem globalen DSGE-Modell (QUEST) (EC 2020), das hier in der E-QUEST Variante genutzt wurde, die Energieinputsubstitution zulässt. Die ausgewiesenen gesamtwirtschaftlichen Effekte unterscheiden sich je nach Modelltyp im Vorzeichen, sind absolut im Vergleich zu einer Referenzentwicklung aber gering. Das ist auch insofern interessant, weil sich der Nutzen der Emissionsvermeidung eigentlich erst langfristig und global ergibt, während die Kosten kurzfristig und regional, allenfalls national anfallen. Möglicherweise hat die Transformation von Volkswirtschaften hin zur Klimaneutralität auch andere positive Wirkungen, die sich z. B. durch verringerte Abhängigkeit von fossilen Energieimporten, Substitution von Energie durch Kapital und

²² <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>

höhere Effizienz von Produktion und Nutzung von Energie ergeben. Deutschland dürfte davon aufgrund seiner Wirtschaftsstruktur und hohen internationalen Wettbewerbsfähigkeit bei Effizienz- und Klimaschutzgütern im internationalen Vergleich überdurchschnittlich profitieren (Lehr et al. 2020a).

CGE-Modelle und makroökonomische Modelle sind jeweils makroökonomische Top-Down-Modelle mit Sektordifferenzierung (Mercure et al. 2019, Europäische Kommission 2018). Die Datenanforderungen sind bei allen Top-down-Modelltypen ähnlich. Sie basieren auf den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen der amtlichen Statistik, die jährlich die Aktivitäten des Staates, der Unternehmen, der privaten Haushalte und des Rests der Welt sowie deren Verflechtungen auf nationaler Ebene erfassen. Darüber hinaus werden die Interdependenzen der verschiedenen Wirtschaftssektoren in Input-Output-Tabellen dargestellt. Diese sind ein notwendiger Bestandteil aller sektoralen makroökonomischen Modelle, die die Auswirkungen von Maßnahmen und Instrumenten erfassen, die sich über den direkt betroffenen Sektor oder Wirkungskanal hinaus auswirken. Darüber hinaus werden Energiedaten benötigt, um die Energiewende zu erfassen. Die beiden Modelltypen können wie folgt voneinander unterschieden werden:

CGE-Modelle basieren auf der neoklassischen Theorie, wobei Haushalte und Unternehmen durch einen Agenten mit rationalen Erwartungen repräsentiert werden, der seinen Nutzen oder Gewinn maximiert. Die Preise passen sich so an, dass Angebot und Nachfrage im Gleichgewicht sind und die Ressourcen vollständig genutzt werden, so dass die Märkte im Allgemeinen ausgeglichen sind. Eine höhere Nachfrage (z. B. für die Energiewende) führt zu höheren Preisen und einer (optimalen) Umverteilung der Ressourcen.

Makroökonomische Modelle folgen häufig einer post-keynesianischen Theorie und obwohl sie sich mehr auf die Nachfrageseite konzentrieren, spielen im Gegensatz zu einfachen Input-Output-Ansätzen beide Seiten des Marktes eine Rolle. Knappheit führt zu höheren Kosten und Preisen. Die Verhaltensparameter werden nicht durch Optimierung, sondern durch ökonometrische Schätzung von Zeitreihendaten bestimmt, so dass empirische Erkenntnisse von großer Bedeutung sind. Die Märkte sind in der Regel nicht geräumt. Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage werden eher durch Mengeneffekte als durch Preiseffekte kompensiert. Tatsächlich bewegen sich fortentwickelte Modelle beider Denkschulen aufeinander zu. So bildet das vielfach für die EU-Kommission eingesetzte CGE-Modell GEM-E3 auch dauerhafte Arbeitslosigkeit ab, während sich makroökonomische Modelle verstärkt mit der Bedeutung der Auslastung des Produktionsapparats und der Verfügbarkeit und den Kosten von Kapital befassen. Eine Analyse mit GEM-E3 (Eurofound 2023) ermittelt positive Beschäftigungseffekte bei Umsetzung des Green Deal in der EU.

Eine aktuelle Metaanalyse des IMF (2023) zeigt, dass es keinen wissenschaftlichen Konsens über die gesamtwirtschaftlichen Effekte von Klimaschutz gibt. Während Ex-ante-Analysen nach fünf Jahren zu leicht negativen Effekten zwischen 0 und -0,5 % beim BIP tendieren, zeigen empirische Studien, die tatsächlich umgesetzte CO₂-Bepreisungen untersuchen, leicht positive Effekte. Die überwiegend leicht negativen Effekte in den Ex-ante-Analysen dürften an den gewählten Modelltypen liegen. Überwiegend wurden Studien auf Basis von CGE-Modellen untersucht, die wie oben beschrieben meist leicht negative Wirkungen von Preisschocks ermitteln, weil die Klimaschutzpolitik den

Optimalzustand in der Referenz verschlechtert. Makroökonomische Modelle dürften zu etwas positiveren Effekten kommen.

Genauer dargestellt und verglichen werden viele der empirischen Studien zur Wirkung von CO₂-Steuern und -preisen in Köppl & Schratzenstaller (2023), die sich vor allem auf skandinavische Länder und British Columbia in Kanada beziehen. Danach zeigt eine wachsende Zahl von Studien, dass CO₂-Steuern die Emissionen senken, ohne dass es zu negativen Wirkungen auf Wachstum, Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit kommt. Viel zitiert wird die empirische Studie von Metcalf & Stock (2023), die für einen CO₂-Preis von 40 USD/t für die EU nach fünf Jahren zu einem signifikant positiven Effekt von um die 1 % auf das BIP kommt. Dabei werden die in 15 EU- und EFTA-Ländern historisch eingeführten CO₂-Steuern betrachtet, nicht das EU-ETS. Die Effekte der CO₂-Steuer werden in einen erwarteten und unerwarteten Teil separiert. Schließlich werden die Änderungen des BIP in Abhängigkeit von dem unerwarteten Teil der CO₂-Steuer mit verschiedenen Methoden (local projection, structural VAR) ökonometrisch geschätzt und in einem Modell die dynamischen Wirkungen ermittelt.

In der aktuellen Gemeinschaftsdiagnose (Gemeinschaftsdiagnose 2023) wird ein Wachstumsmodell eingesetzt, das um den Faktor Energie, aufgeteilt in erneuerbare und fossile Energien, erweitert wurde. Es werden damit drei Szenarien gerechnet, ein Szenario „keine Energiewende“, ein Szenario „10-Jahres-Trend“ mit Fortschreibung des historischen Ausbaus der erneuerbaren Energien sowie ein Szenario „beschleunigter Ausbau“. Unter der Annahme einer konstanten gesamtwirtschaftlichen Investitionsquote führt der Ausbau erneuerbarer Energien nach Trend dazu, dass sich das BIP bis zum Jahr 2030 um rund 1,5 % gegenüber der Referenz ohne Energiewende reduziert. Ein beschleunigter Ausbau erhöht das BIP gegenüber dem Trend um rund 0,5 %. Es würde aber in diesem Fall immer noch 1 % niedriger liegen als im Referenzszenario „ohne Energiewende“. Wird eine deutlich höhere gesamtwirtschaftliche Investitionsquote (zu Lasten des Konsums) angenommen, könnte das BIP im Jahr 2030 höher liegen als in dieser Referenz. In der Studie wird auch auf die Bedeutung der angenommenen Substitutionselastizität zwischen Energie und dem Aggregat aus Arbeit und Kapital eingegangen. Sie beschreibt, wie stark sich das Einsatzverhältnis bei Änderung der relativen Preise verändert. In früheren Untersuchungen wurde in der Gemeinschaftsdiagnose mit einer niedrigen Elastizität von -0,02 gerechnet. Mit Blick auf die Literatur wird jetzt eine Substitutionselastizität von -0,2 und zusätzlich eine Elastizität von -0,5 für eine Sensitivität genutzt. Eine niedrige Elastizität führt zu sehr viel stärkeren BIP-Verlusten der Energiewende, während bei einer Elastizität von -0,5 das BIP etwas höher liegt. Der Rückgang gegenüber der Referenz ist bei dieser hohen Elastizität sehr gering.

Über die Höhe der Substitutionselastizitäten gibt es in der Literatur keinen Konsens, wobei allgemein anerkannt ist, dass langfristige Preiselastizitäten größer sind als kurzfristige (Labandeira et al. 2017). Lutz et al. (2017) berechnen auf Basis der amtlichen Firmendaten Deutschland (langfristige) Eigenpreiselastizitäten für die Industriesektoren auf der 2-Stellerebene der Statistik zwischen -0,39 und -0,8. Internationale Studien weisen in eine ähnliche Richtung, wobei es Studien mit niedrigeren Werten gibt und darauf verwiesen wird, dass sich Elastizitäten auch von Energieträger zu Energieträger unterscheiden können (Labandeira et al. 2017, Gao et al. 2020, Chang et al. 2019).

Danach sind die Szenariorechnungen in der Gemeinschaftsdiagnose mit niedrigen Preiselastizitäten von -0,2 oder sogar -0,02 eher als kurzfristig zu interpretieren. Einschränkend ist zu ergänzen, dass die ökonometrischen Methoden und Ansätze zur Bestimmung der Preiselastizitäten heterogen sind und sich auf die Vergangenheit beziehen also sicherlich Unschärfen bei ihrem Einsatz und ihrer Interpretation bestehen.

Tabelle 12: Berechnete Effekte des Klimaschutzes auf die Wirtschaftsleistung im Vergleich zu einer Referenz

Studie	Modelltyp* (Sektoren)	Regionale Abgrenzung	Szenarien	Effekt auf BIP bzw. Produktionspotenzial
EC (2020)	CGE (51 Produkte)	Welt, alle EU-Staaten und wichtige Handelspartner separat	Green Deal vs. EU Referenz, („Fragmented action“ und „Global action“ jeweils mit 50 % und 55 % Emissionsreduktionsziel)	-0,02 bis -0,7 % (EU, 2030)
	MÖ			+0,12 bis +0,55 % (EU, 2030)
	DSGE			-0,29 bis +0,13 % (EU, 2030)
Espagne et al. (2023)	MÖ (43, 70 in der EU)	Welt, 70 Länder, EU-Staaten und wichtige Handelspartner separat	Global decarbonization (Temperaturanstieg deutlich unter 2°C)	+2% DE in 2030
Gemeinschaftsdiagnose (2023)	WM	DE	„beschleunigter Ausbau“ vs. „keine Energiewende“	-0,7 % (2030), bei anderen Annahmen aber auch deutlich abweichende Ergebnisse
UBA (2024a)	DSM (72 Produktionsbereiche)	DE	MWMS vs. MMS	+0,2 bis +0,5% pro Jahr

Quelle: Eigene Zusammenstellung. CGE = Computable General Equilibrium, MÖ = makroökonomisch, WM = Wachstumsmodell, DSGE = Dynamic Stochastic General Equilibrium, DSM = Dynamic simulation model.

Für die Interpretation von Szenarioanalysen spielt die Spezifikation der Szenarien eine große Rolle. So sind das Ambitionsniveau und die Untersetzung des Klimaschutzszenarios mit Maßnahmen entscheidend. Viele ökonomische Modelle können Änderungen relativer Preise gut aufnehmen, während die Politik häufig kleinteilige Regelungen mit Ordnungsrecht und Förderung bevorzugt. Gerade für Fördermaßnahmen ist die Quantifizierung der Wirkungszusammenhänge schwierig. Bei der Modellierung von

Klimaschutzpolitik über CO₂-Preise ist die Verwendung der Einnahmen im Modell für die gesamtwirtschaftlichen Ergebnisse wichtig.

Tabelle 12 fasst Modellierungsergebnisse wichtiger Studien zu den gesamtwirtschaftlichen Effekten von Klimaschutz zusammen. Verallgemeinernde Schlüsse sind schwierig, weil sich nicht nur die Modelltypen und die sektorale Abgrenzung, sondern insbesondere auch die Szenarien, d. h. die Ausgestaltung der jeweiligen Referenz und des Klimaschutzenszenarios unterscheiden. Die ermittelten Abweichungen des BIP liegen recht dicht um Null, wobei in den letzten Jahren die Zahl der Studien mit positiven Ergebnissen zunimmt. So weisen die drei Modelle, die für das Impact Assessment der EU-Kommission im Jahr 2020 zur Evaluation des Green Deal genutzt wurden, unterschiedliche Vorzeichen bei unterschiedlichen Ausgestaltungen im Vergleich zu einer Referenz aus. Dabei kommt das CGE-Modell zu leicht negativen, das makroökonomische Modell zu leicht positiven Effekten des verstärkten europäischen Klimaschutzes. Beim DSGE-Modell QUEST liegen die Ergebnisse mit unterschiedlichen Vorzeichen nahe bei null.

Tabelle 13: Berechnete Effekte des Klimaschutzes auf die Wirtschaftsleistung im Vergleich zu einem anderen Klimaschutzszenario

Studie	Modelltyp* (Sektoren)	Regionale Abgrenzung	Szenarien	BIP-Effekt
Bundesbank (2022)	DSGE	2-Sektoren (DE/EU und Welt)	„orderly transition“ vs. „disorderly transition“	Bruttowertschöpfung um 1 % höher (2050) in der orderly transition ggü der disorderly transition
IEA (2021)	unklar	Welt	Net Zero Emissions vs. aktuelle Politikmaßnahmen (NZE- vs. STEPS)	Globales BIP jedes Jahr um 0,5% höher (2026-2030)
Sievers et al. (2023)	CGE (25)	18 Weltregionen, darunter DE	Szenario „Energiesouveränität“ vs. „Technologiemix“	-0,63 % (DE, 2030)
	DSM (72)	DE	verschiedene Technologieszenarien vs. Technologiemix-Szenario	-0,6 bis +1,1 % (2030)

Quelle: Eigene Zusammenstellung. *CGE = Computable General Equilibrium, DSM = Dynamic simulation model, DSGE = Dynamic Stochastic General Equilibrium.

Eine Modellstudie des IWF (Espagne et al. 2023) kommt zu deutlichen positiven Effekten globalen Klimaschutzes für Deutschland. Nach der Gemeinschaftsdiagnose führt eine beschleunigte Energiewende in Deutschland zu negativen Effekten. Nach der sozio-ökonomischen Folgenabschätzung zum Projektionsbericht 2023 (UBA 2024a) ergibt das Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario, das die Klimaschutzziele erreicht, im Vergleich zum Mit-Maßnahmen-Szenario als Referenz positive Effekte auf das BIP von 0,2 bis 0,5% pro Jahr.

In anderen Studien werden unterschiedliche Ausgestaltungen von Klimaschutz miteinander verglichen, was zeigt, dass auch das Design der Klimaschutzpolitik die Ergebnisse beeinflussen kann und Interpretationen mit gewisser Vorsicht erfolgen sollten, weil nicht immer oder erst nach längerer Suche in den Studien klar wird, welches Szenario womit verglichen wird (vgl. Tabelle 13). Dabei führen geordnete Szenarien mit guter Planbarkeit und Technologieoffenheit in der Regel zu besseren Ergebnissen.

3.3.3 Erkenntnisse

In der Literatur werden verschiedene Wirkungskanäle von Klimaschutzmaßnahmen aufgeführt. Weitgehende Einigkeit besteht, dass höhere CO₂-Preise und zusätzliche Investitionen in die Energiewende notwendig sind, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen. Allerdings bergen Investitionen in Klimaschutz die Gefahr von stranded assets, wenn der Kapitalstock vorzeitig ersetzt wird. Neben den Investitionseffekten treten u. a. Substitutions- und Preiseffekte auf, die wiederum von den Elastizitäten und Wirkungsmechanismen abhängen. Klimaschutzinvestitionen zielen in der Regel entweder auf eine Steigerung der Energieeffizienz oder auf die Erzeugung erneuerbarer Energien. Die dahinter stehenden Transmissionsmechanismen des Ausbaus erneuerbarer Energien und von verstärkter Energieeffizienz können sich deutlich unterscheiden. Die Verfügbarkeit von qualifizierten Fachkräften ist aufgrund der Knappheiten am Arbeitsmarkt im Hinblick auf die Outputwirkung der Investitionen entscheidend. Klimaschutz sollte möglichst international umgesetzt und vorhersehbar gestaltet werden, weil dies die Kosten für (nationalen) Klimaschutz senkt. Die Wirkungen des Klimaschutzes sollten immer mit den Wirkungen des Klimawandels zusammen betrachtet werden, die bei einem Ausbleiben von Klimaschutz entstehen. Denn Klimaschutz im Sinne einer Vermeidung von Klimawandelschäden führt langfristig zu erheblichen positiven volkswirtschaftlichen Effekten. Aufgrund der bereits in vorangegangenen Kapiteln dargelegten Begrenzungen bei der Abbildung von Klimawandelschäden im Rahmen von Modellierungen, der zeitlich verzögerten Wirkung von Klimaschutz und Klimawandelschäden und dem Charakter des Klimaschutzes als internationalem öffentlichen Gut, ist dies jedoch nicht ohne weiteres möglich. Der Fokus liegt daher in der Regel auf einer Abbildung direkter, national wirksamer gesamtwirtschaftlicher Effekte von Klimaschutz im Sinne von Veränderungen wie etwa des BIP oder der Beschäftigung.

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte derartiger Klimaschutzmaßnahmen sind in ihrer Richtung nicht eindeutig und von vielen Faktoren abhängig. Stärker angebotsorientierte Ansätze kommen dabei zu etwas negativeren Effekten des Klimaschutzes als nachfrageorientierte. Dabei spielt neben der Instrumentierung insbesondere die Frage eine Rolle, ob höhere Investitionsquoten möglich sind, sodass die Investitionen in ein dekarbonisiertes Energiesystem zusätzlich getätigt werden können, oder ob sie andere

Investitionen (teilweise oder ganz) verdrängen (Crowding-out-Effekt). Die Annahme hierüber kann von entscheidender Bedeutung für die Höhe und das Vorzeichen der wirtschaftlichen Effekte sein. Die Frage der Zusätzlichkeit und Verdrängung stellt sich auch bei langlebigen Konsumgütern. Zudem gibt es Unterschiede bei den Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen zwischen Branchen: Energieintensive Wirtschaftszweige sind abhängiger von Energiepreisen, sodass sie von höheren CO₂-Preisen und dadurch ausgelöst höheren Investitionen in das Energiesystem stärker und direkter betroffen sind. Folglich sind Aspekte des Strukturwandels relevant für die Analyse. Schließlich ist die Bedeutung des internationalen Zusammenhangs zu beachten, der in nationalen Studien meist ausgeblendet wird, während in internationalen Studien Klimaschutzpolitik und Struktur der Volkswirtschaft oft (zu) stark vereinfacht modelliert werden. Internationale Effekte sind vor allem Wettbewerbseffekte, wenn die CO₂-Kosten in einem Land im Vergleich zunehmen und Möglichkeiten zum Export von Klimaschutzgütern, wenn andere Länder verstärkten Klimaschutz betreiben. Außerdem sinken die Kosten der Klimaschutztechnologien mit dem globalen Ausbau.

3.4 Zusammenhang der Wirkungskanäle und Interaktionen

Klimawandel, Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz werden bisher meist getrennt analysiert, wenn Wirkungskanäle und Interaktionen betrachtet werden (Howarth & Robinson 2024). Auf EU-Ebene werden z.B. getrennte Impact Assessments für Klimawandel und Anpassung (EC 2021) auf der einen Seite und den Klimaschutz auf der anderen Seite durchgeführt, wobei der jeweils andere Aspekt nicht in die Betrachtung einbezogen wird. Die wechselseitige Nichtberücksichtigung liegt auch darin begründet, dass Klimawandel, Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich wirken. Aufgrund verschiedener Trägheiten der natürlichen Systeme wirken sich THG-Emissionen erst mit zeitlicher Verzögerung auf das Klima und letztlich auch die wirtschaftlichen Zusammenhänge aus. Die Effekte des Klimawandels sind komplex, regional sehr unterschiedlich und bei akuten Schäden durch Extremwetter immer mit der Frage der Zurechnung zum Klimawandel verbunden (zu Attributionsforschung siehe bspw. Hirschfeld et al. (2021, 19 ff.)). Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel sind dagegen ökonomisch unmittelbar wirksam und können räumlich zugeordnet werden, wobei Anpassungsmaßnahmen räumlich begrenzt sind und sich zahlreiche Herausforderungen bei der Bewertung des jeweiligen Nutzens ergeben – auch weil anders als beim Klimaschutz bisher keine quantitativen Anpassungsziele vorliegen. Ein direkter Vergleich von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen ist aus diesen Gründen schwierig.

Mit dem Klimaschutz und der Anpassung an den Klimawandel stehen zwei Strategien zur Minderung des Klimawandels und seiner Wirkungen zur Verfügung. Klimaschutzmaßnahmen wurden dabei in der globalen Governance priorisiert (Howarth & Robinson 2024). Ein Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim BMF (Bundesministerium der Finanzen 2010) stellt die beiden Handlungsoptionen gegenüber. Danach unterscheiden sich beide Optionen vor allem dadurch, dass Emissionsvermeidung ein globales öffentliches Gut darstellt, während Anpassungsmaßnahmen private oder regional begrenzte öffentliche Güter darstellen, bei denen Kostenträger und Nutznießer übereinstimmen.

Eine rationale nationale Klimapolitik solle demnach verstärkt auf Anpassungsmaßnahmen setzen (Bundesministerium der Finanzen 2010, S. 7). In globalen Betrachtungen und Modellierungen gibt es bereits eine lange Debatte um die „optimale“ Klimapolitik, die stark mit der Bewertung zukünftiger Schäden und der zu ihrer Bewertung passenden Diskontrate sowie der Unsicherheit über zukünftig verfügbare Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen verbunden ist. Viele Umweltökonominnen haben dabei für eher weniger Klimaschutz in der kurzen Frist argumentiert (Nordhaus 1992), während u.a. Stern (2007) auf die hohen Kosten des Klimawandels und die vergleichsweise geringen Kosten des ambitionierten Klimaschutzes hingewiesen hat und deshalb kurzfristig umfassende Klimaschutzmaßnahmen gefordert hat. Diese Debatte wurde vor allem auf der Basis eher einfacher globaler Modelle geführt, die nicht nach Sektoren und oft auch zeitlich wenig differenziert sind.

Arbeiten für das NGFS (NGFS 2023a) unterscheiden zwischen ökonomischen Risiken (Effekten) der Klimaschutzpolitik, den sog. Transitionsrisiken auf der einen Seite, und den Risiken des Klimawandels auf der anderen Seite, die akut in Form von Extremereignissen oder chronisch durch den langfristigen Temperaturanstieg auftreten wie z.B. der langfristige Meeresspiegelanstieg. Die Klimaschutzpolitik gefährdet bzw. verändert die ökonomische Entwicklung demnach durch höhere Energiepreise, die Entwertung des Kapitalstocks, ein mögliches Mismatch auf dem Arbeitsmarkt, Veränderungen bei Investitionen und Konsum sowie Innovationen. Akute physische Risiken des Klimawandels wirken dagegen über die Zerstörung von Kapital, Angebotsstörungen auf dem Arbeitsmarkt durch sinkende Produktivität bei Hitze, geringere landwirtschaftliche Produktion, Störung von Produktionsketten, erhöhte Versicherungskosten oder Migration. Modellergebnisse für ein Net Zero 2050 Szenario mit dem Modell NiGEM zeigen, dass die globalen Wirkungen von akutem Klimawandel gegenüber einem Referenzszenario bis 2050 deutlich größer ausfallen als die chronischen Kosten des Klimawandels, die wiederum größer sind als die Kosten des Klimaschutzes, d.h. der Erreichung des globalen THG-Minderungsziels (NGFS 2023b). In einem Szenario ohne zusätzlichen Klimaschutz könnten sich die Kosten des Klimawandels im Vergleich zum Klimaschutzszenario, in dem THG-Neutralität (Net Zero 2050) erreicht wird, bis 2050 mehr als verdoppeln. (Global) erfolgreicher Klimaschutz kann die Kosten des Klimawandels demnach also stark reduzieren. Anpassungsmaßnahmen sind in dieser Modellanalyse leider nicht betrachtet.

Der bereits unter 3.3 aufgeführte Überblick der ECB (2023) betrachtet die Wirkungen von Klimawandel und Klimaschutz auf die Komponenten des Produktionspotenzials. Auch die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen werden kurz beschrieben. Interaktionen von Wirkungskanälen werden dabei nicht aufgeführt.

Nach dem Synthesebericht des 6. Sachstandsberichts des (IPCC 2023a) reduziert erfolgreiche Anpassung die Wirkungen des Klimawandels. Zugleich erleichtert erfolgreicher globaler Klimaschutz die Anpassung an den Klimawandel.

Die unterschiedlichen Skalenebenen, nämlich zeitlich, räumlich und bezüglich der betroffenen Sektoren, auf denen Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel stattfinden, dürften der Grund dafür sein, dass sich gesamtwirtschaftliche Analysen mit sektoraler Differenzierung bisher nicht mit allen drei Effekten gleichzeitig auseinandergesetzt

haben. Für Deutschland finden sich zum Thema bisher z.B. eine Bewertung auf Ebene kommunaler Konzepte und Strategien (Bender et al. 2022). Dabei wird deutlich, dass es Synergien und Zielkonflikte geben kann. Während einzelne Maßnahmen nur auf Klimaschutz oder Anpassung zielen, gibt es auch Maßnahmen, die beides verbinden. Dabei gibt es Anpassungsmaßnahmen, die den Klimaschutz negativ beeinflussen (sog. Maladaptation) und Klimaschutzmaßnahmen, die schlecht für die Anpassung an den Klimawandel sind. Eine Bewertung hängt somit von konkreten Umsetzungen einzelner Maßnahmen ab und kann nicht verallgemeinert werden.

Beim Vergleich der von Klimawandel, Anpassung und Klimaschutz stark betroffenen Wirtschaftsbereiche zeigt sich, dass die Überschneidungen begrenzt sind. Der Klimawandel betrifft vor allem Landwirtschaft, Transportgewerbe, Gesundheitswesen, das Versicherungsgewerbe und die Infrastruktur. Anpassung zielt auf die Verringerung der Schäden durch den Klimawandel, notwendige Investitionen zur Anpassung an den Klimawandelfolgen entfallen in beiden Anpassungsszenarien vor allem auf das Baugewerbe. Klimaschutz führt zu starken Veränderungen im Energiesektor, in der energieintensiven Industrie sowie bei Fahrzeugen und in der Gebäudetechnik. Das Baugewerbe spielt auch für den Klimaschutz eine zentrale Rolle. In der Landwirtschaft kann es durch u.a. Biokraftstoffe, ökologischen Landbau, PV- und Windkraftanlagen oder die Wiedervernässung von Mooren Flächenkonkurrenzen geben.

Angesichts der noch wenig untersuchten Zusammenhänge zwischen Klimawandel, Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz auf nationaler und regionaler Ebene ist die Bestimmung eines optimalen Mix zwischen Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen auf Basis der Literatur komplex und stark von Annahmen und Zielformulierung abhängig. Wegen der verbindlichen nationalen Klimaschutzziele für 2030 und 2045 ist die Frage aus wirtschaftlicher Sicht vielmehr, welches Maß an Anpassung zur Reduzierung der Wirkungen des Klimawandels sinnvoll ist. Wenn dabei Maßnahmen komplementär sind und der Anpassung und dem Klimaschutz gleichermaßen dienen, ist das umso besser.

4 Quantifizierung der Auswirkungen zusätzlicher Extremwetterereignisse und der Gegenmaßnahmen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung, die Wertschöpfungsstrukturen und das Produktionspotenzial

Im Folgenden wird das makroökonomische Modell PANTA RHEI eingesetzt, um die gesamtwirtschaftlichen und sektoralen Effekte der verschiedenen Aspekte des Klimawandels in Form zusätzlicher Extremwetterereignisse im Inland, der Anpassung daran und des Klimaschutzes für Deutschland abzuschätzen. Dabei handelt es sich um eine szenariobasierte Analyse, es werden also mögliche Entwicklungen und die damit verbundenen Folgen für die Ökonomie in Deutschland aufgezeigt. Anders als bei Prognosen, wird im Folgenden also nicht versucht, die zukünftige Entwicklung möglichst genau zu treffen, sondern es werden die Folgen bestimmter, sehr wahrscheinlicher Entwicklungen sowie die Wirkungen von Handlungsoptionen aufgezeigt. Dabei fokussiert sich die Analyse auf die im Modell darstellbaren Größen, wodurch eine Abstraktion zur Wirklichkeit stattfindet und nicht alle Klimawirkungen und Reaktionsmöglichkeiten im Detail dargestellt werden. Vielmehr stellt die Analyse auf die wichtigsten, zentralen Hebel und Wirkungsketten ab, sodass die Ergebnisse der Modellrechnungen einen guten Überblick über die grundlegenden, zu erwartenden Folgen des Klimawandels sowie die Effekte von Klimaschutz und Klimaanpassung bieten.

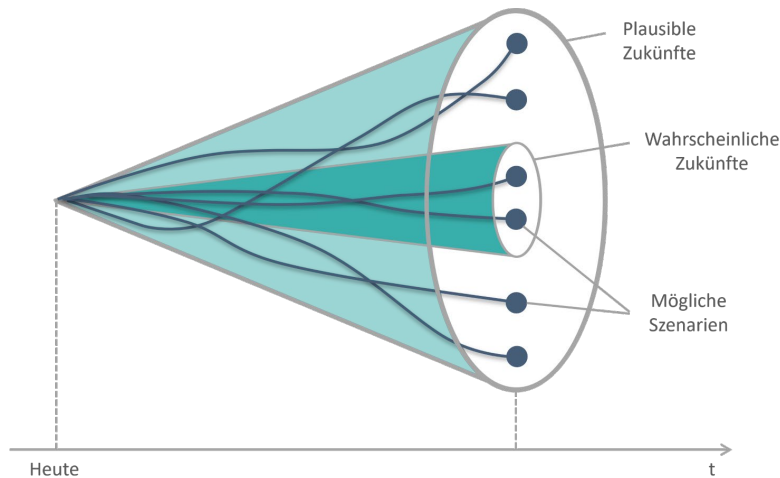
4.1 Abbildung im makroökonomischen Modell PANTA RHEI

4.1.1 Funktionsweise, Unsicherheiten und Herausforderungen der Szenario-Analyse

Die zukünftige Entwicklung ist grundsätzlich mit Ungewissheit und Unsicherheit verbunden. Je weiter der Zeithorizont in der Zukunft liegt, desto unsicherer die zukünftige Entwicklung. Potenziell sind immer mehrere, unterschiedliche Zukunftspfade denkbar, wobei es im Raum der möglichen Zukünfte, die grundsätzlich plausibel erscheinen auch wahrscheinliche Zukünfte gibt, die sich basierend auf den heutigen Erkenntnissen mit einer größeren Wahrscheinlichkeit einstellen. Die Szenarioanalyse ist eine Methode zum Umgang mit den verschiedenen Arten von Ungewissheiten und Unsicherheiten in der Zukunft. In dem konsistenten Modellrahmen, der definitorische Zusammenhänge der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen fortschreibt, werden einzelne oder wenige Parameter verändert. Das Ergebnis beschreibt dann die direkten, indirekten und induzierten Wirkungen dieser unterschiedlichen Annahmensets, den Szenarien (Abbildung 29).

Langfristprojektionen der sozio-ökonomischen Entwicklung stehen auch vor der Herausforderung, dass Menschen lernen und sich menschliches Verhalten an veränderte Rahmenbedingungen anpasst. Wie die Menschen ihr Verhalten in Zukunft verändern werden, ist wiederum von heute unbekannten Entwicklungen abhängig, wie z.B. der Wahl des nächsten US-Präsidenten, neuen KI-Entwicklungen oder auch dem Klimawandel.

Abbildung 29: Lösungsraum für plausible Zukünfte, wahrscheinliche Zukünfte und Szenarien als eine mögliche Entwicklung der Zukunft



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

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung und der Folgen des Klimawandels bestehen mehrere Arten der Unsicherheit. Auch wenn es Konsens darüber gibt, dass die globale Erwärmung weiter voranschreitet und Extremwetterereignisse häufiger und intensiver werden (IPCC 2021; Brien et al. 2020; Lange et al. 2020), sind Ort, Häufigkeit und Intensität der Klimawandelfolgen unsicher. Auch hinsichtlich der ökologischen, sozialen und ökonomischen Effekte bestehen verschiedene Unsicherheiten. Mit den Klimawirkungsketten liegen qualitative Beschreibungen vieler Wirkungszusammenhänge vor (Becker et al. 2016; Kahlenborn et al. 2021b), Unsicherheiten bestehen aber hinsichtlich der konkreten Auswirkungen auf die Systeme und insbesondere der Wechselwirkungen. Auswirkungen auf die Gesellschaft und die Ökonomie sind auch mit verschiedenen Unsicherheiten verbunden, so lässt sich bisher nur ein Teil der biophysikalischen Klimawirkungen in ökonomische Größen übersetzen. Klimawirkungen, die sich nicht unmittelbar monetarisieren bzw. mit einem Modell bewerten lassen sind z.B. der Verlust an Artenvielfalt oder die Verschlechterung der Lebensqualität.

Eine weitere Herausforderung liegt in den grundlegenden Unterschieden in der Zielsetzung von Klimaschutz und Klimafolgenanpassung sowie dem unterschiedlichen Forschungsstand dazu. Bezüglich des Klimaschutzes sind feste THG-Reduktionsziele vereinbart, mit Unsicherheiten wie diese Ziele erreicht werden können. Zur Klimafolgenanpassung liegen bisher nur qualitative Ziele vor, quantitative und messbare Ziele für die DAS-Cluster und Handlungsfelder sind derzeit noch in Arbeit. Anpassung soll die Widerstandsfähigkeit erhöhen und die Anfälligkeit gegenüber den Klimawandelfolgen verringern. Sie ist damit an den Klimawandelfolgen ausgerichtet, deren Effekte wie oben skizziert bereits mit Unsicherheiten verbunden sind, sodass sich diese für die Klimaanpassung noch vergrößern.

4.1.2 Vorgehen

Im Folgenden werden zusätzliche Extremwetterereignisse, die vereinfacht abgeschätzte Anpassung daran sowie der Klimaschutz in unterschiedlichen Szenarien modelliert, um ihre Wirkungen auf die wirtschaftlichen Strukturen abzuschätzen. Die Szenarien werden als Vorgaben in das Modell PANTA RHEI eingestellt. Unterschiede in den Ergebnissen

beschreiben schließlich die unterschiedlichen sektoralen und gesamtwirtschaftlichen Effekte im konsistenten Modellrahmen. Wichtig hierbei ist zu verstehen, dass in der Szenariodarstellung nur monetarisierbare und im ökonomischen Modellrahmen vorhandene Parametergrößen verändert werden können. Die Szenarioanalyse abstrahiert also von der Realität und vermittelt einen Eindruck darüber, wie sich die wirtschaftlichen Zusammenhänge in verschiedenen Zukunftskontexten verändern würden und wie und ob Maßnahmen zum Verhindern ungünstiger Entwicklungen wirken könnten.

Zur Abbildung der Extremwetterereignisse werden zunächst die (bio-)physikalischen Wirkungen in ökonomische Wirkungen übersetzt und quantifiziert. Diese werden dann als Input in den jeweiligen Wirtschaftsbereichen für die Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Effekte in PANTA RHEI verwendet. Durch die direkten Wirkungen werden im Modell weitere indirekte und induzierte Wirkungen ausgelöst. Die Effekte des Klimawandels lassen sich insbesondere durch Veränderung der Produktionskostenstruktur, Veränderung der Produktivität, Veränderung der Endnachfrage, Veränderung von Investitionen, Veränderung der öffentlichen Ausgaben sowie Veränderung von (Import-)Preisen abbilden. Dieses Vorgehen entspricht dem aus dem BMWK-Projekt Kosten durch Klimawandelfolgen (vgl. Flaute et al. 2022). Anpassungsmaßnahmen werden einmal durch die erforderlichen Ausgaben und andererseits durch die verminderten Schäden definiert.

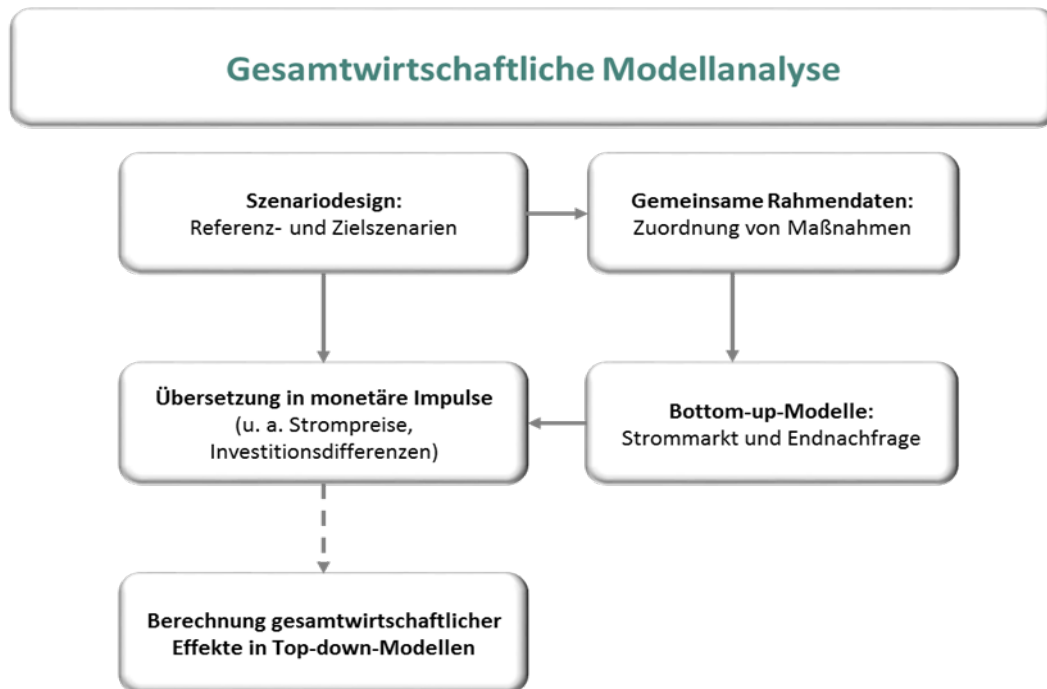
Um volkswirtschaftliche Wirkungen des Klimaschutzes zu berechnen, werden die Ergebnisse aller zu betrachtenden Maßnahmen und unterschiedlichen Entwicklungen, die sich aus den Bottom-up-Modellen der Prognos zum Klimaschutz ergeben, in das gesamtwirtschaftliche Modell PANTA RHEI eingestellt. Bestandteile der Bottom-up-Modelle sind ein Strommarktmodell sowie Endnachfragemodelle für die Sektoren Industrie, GHD, Verkehr und Gebäude. Darin werden Investitionsunterschiede, die Entwicklung der Energienachfrage und die Entwicklung auf dem Strommarkt inklusive der Strompreise nach unterschiedlichen Abnehmergruppen ermittelt. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Elemente der gesamtwirtschaftlichen Modellanalyse. Es handelt sich um eine „weiche“ Verknüpfung durch den Austausch von Daten über ausgewählte Schnittstellen (soft link). Die Ergebnisse der Energiesystemmodelle (bottom-up) gehen dabei als Input in das gesamtwirtschaftliche Modell (top-down) ein.

Die verwendeten Modelle unterscheiden sich vereinfacht gesagt dadurch, dass der Fokus im Fall eines Bottom-up-Modells auf einem einzelnen Sektor (z. B. der Elektrizitätswirtschaft, der Energienachfrage der privaten Haushalte oder dem Verkehr) liegt, welcher dann mit der jeweiligen (Markt-)Logik detailliert abgebildet wird. In diesem Fall werden Rückkopplungen zur Gesamtwirtschaft nicht berücksichtigt. Im Fall eines gesamtwirtschaftlichen Modells wie PANTA RHEI stehen die Verknüpfung aller Sektoren oder Industrien und ihre Rückkopplungen über die gesamtwirtschaftliche Entwicklung im Zentrum der Betrachtung.

Eine Iteration zwischen Energiesystemmodellierung und Makromodell ist nicht vorgenommen worden. Sie wäre sehr aufwändig gewesen und Änderungen im gesamtwirtschaftlichen Modell hätten nur sehr begrenzten Einfluss auf die Ergebnisse Energiesystemmodellierung gehabt. Auch auf eine Kalibrierung des Makromodells an die gesamtwirtschaftlichen Annahmen, die in die Erstellung der Roadmap Energieeffizienz

eingeflossen sind, ist nicht erfolgt. Dem Vorteil der Konsistenz bei einer Iteration steht der Nachteil der Veränderung des gesamtwirtschaftlichen Modells gegenüber, was gerade die Aussagekraft der Effekte auf das Produktionspotenzial in Abschnitt 4.4 eingeschränkt hätte.

Abbildung 30: Ablauf einer gesamtwirtschaftlichen Modellanalyse zum Klimaschutz



Quelle: Lutz et al. (2018)

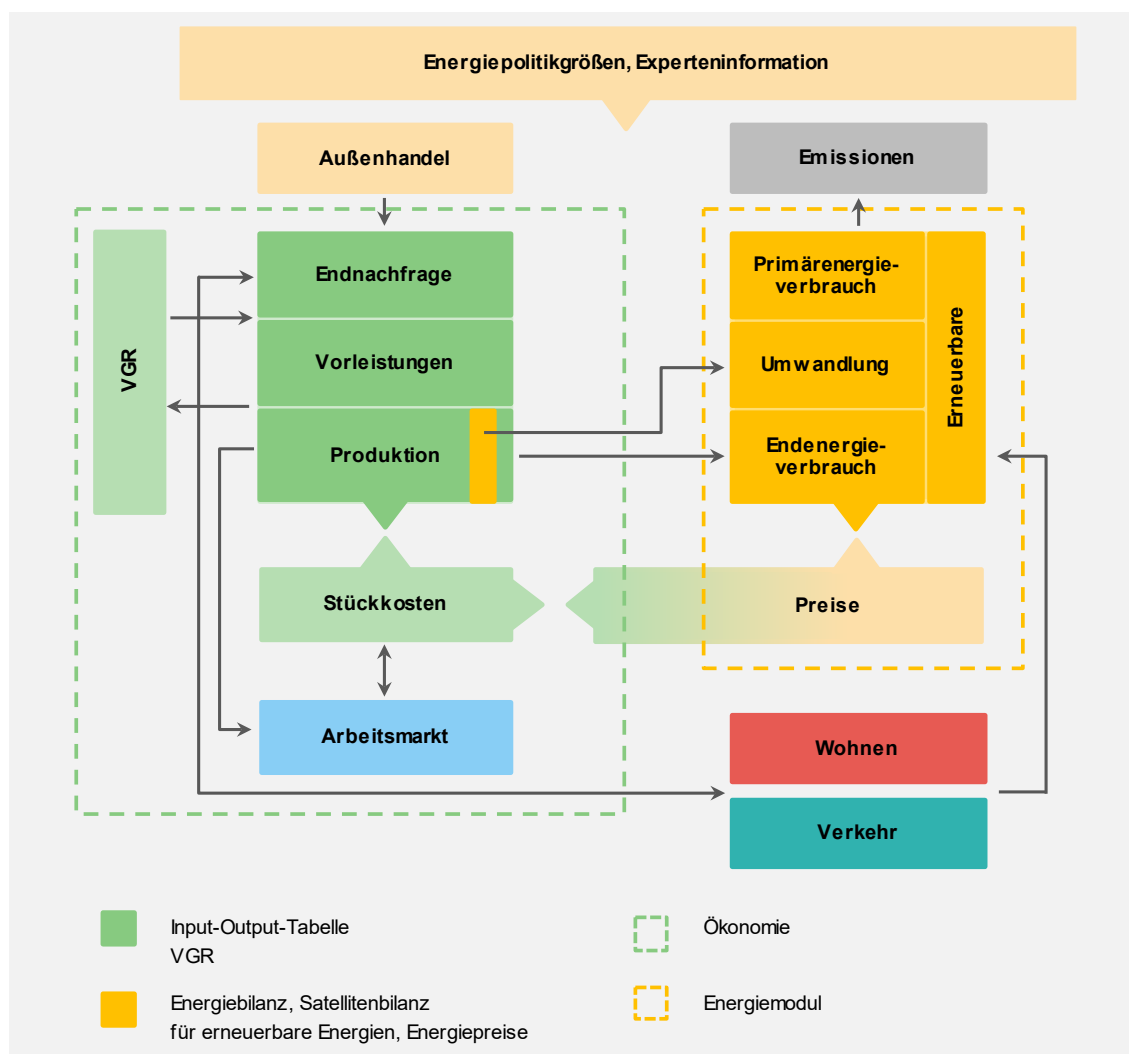
4.1.3 Das Modell INFORGE/PANTA RHEI

Das nationale Modell PANTA RHEI ist eine zur Analyse umweltökonomischer Fragestellungen erweiterte Version des Simulations- und Prognosemodells INFORGE (Becker et al. 2022). Dabei handelt es sich um ein makroökonomisches Modell, in dem der langfristige intersektorale Strukturwandel in der wirtschaftlichen Entwicklung mithilfe von Input-Output-Tabellen auf der Ebene von Wirtschaftszweigen abgebildet wird. Grundsätzlich wird dabei angenommen, dass Zusammenhänge und Größenordnungen der Vergangenheit auch in Zukunft gelten, Einflussfaktoren also ähnlich wirken wie in der Vergangenheit. Detaillierte technologische Veränderungen wie der Umbau der Stahlindustrie hin zu grünem Wasserstoff oder die Verlagerung der Autoproduktion vom Verbrenner zum Elektroauto, d. h. der intrasektorale Strukturwandel, werden nicht automatisch erfasst. Für die Abbildung der intrasektoralen Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft müssen weitergehende Annahmen getroffen werden.

Das Modell wird u. a. regelmäßig für Projektionen des Arbeitskräftebedarfs, der Branchenentwicklung und der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung eingesetzt (Zika et al. 2021; Zika et al. 2022; Zika et al. 2023; Schneemann et al. 2023). In PANTA RHEI werden die ökonomischen Zusammenhänge aus INFORGE um Energie- und Emissionsmodellierungen ergänzt und konsistent miteinander verknüpft, sodass Wechselwirkungen zwischen diesen Bereichen im Modell nachgezeichnet werden (Lutz et al. 2021b). Grundlegende Modellzusammenhänge werden in Lutz et al. (2021a) dargestellt.

Das historische Fundament des Modells wird aus einer Vielzahl gesamtwirtschaftlicher und sektoraler Daten auf Basis der amtlichen Statistiken gespeist. Die Energiebilanzen der AG Energiebilanzen (AGEB verschiedene Jahre) und die Emissionsdaten des UBA (2022, 2023b) ergänzen die Datenbasis. Auf Grundlage dieser historischen Zeitreihen der Jahre 1991 bis an den aktuellen Rand werden alle Verhaltensparameter ökonometrisch geschätzt. Dies impliziert, dass die Akteure nur myopische Vorstellungen haben und Entscheidungen gemäß in der Vergangenheit beobachteten Mustern treffen. Damit wird kein optimierendes Verhalten angenommen, sodass sich die Märkte nicht unbedingt in einem Gleichgewicht befinden. Das Modell wird iterativ Jahr für Jahr gelöst und ist in der Regel bottom-up aufgebaut; d. h., dass erst auf sektoraler Ebene gerechnet und anschließend in den makroökonomischen Variablen aggregiert wird.

Abbildung 31: Struktur des umweltökonomischen Modells PANTA RHEI



Quelle: GWS

PANTA RHEI ist in den vergangenen Jahren vielfältig zur Szenarioanalyse eingesetzt worden. Im Rahmen der Energieszenarien der Bundesregierung wurde es zur Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Energiewende (Lutz et al. 2018) und für die sozio-ökonomische Folgenabschätzung zum NECP genutzt (Lutz et al. 2021b). Im Projekt „ReCap“ wurden verschiedene Maßnahmensets wie CO₂-Steuern im Nicht-ETS-

Bereich mit Senkung der EEG-Umlage, Erhöhung der Energiesteuersätze, Effizienzförderung in der Industrie eingestellt und mit Blick auf Rebound-Effekte betrachtet (Lutz et al. 2021a, Ahmann et al. 2022). Auch verschiedene Subventionen, Förderprogramme wie zur Gebäudesanierung und Umlagen können in das Modell eingestellt werden. Regelmäßig werden mit PANTA RHEI Nettobeschäftigungseffekte der erneuerbaren Energien (Lehr et al. 2012) und des Übergangs zu einer Green Economy bestimmt. Verschiedene Anwendungen beschäftigen sich mit dem Übergang zur E-Mobilität und entsprechenden Maßnahmen. Berechnungen zu Verteilungswirkungen umweltpolitischer Instrumente finden sich in Schneller et al. (2020). Auch für die Berechnung der makroökonomischen Wirkungen des Klimawandels und der Anpassung an den Klimawandel wurde das Modell bereits in verschiedenen Projekten eingesetzt (Lehr et al. 2016, Lehr et al. 2020b, Flaute et al. 2022).

4.2 Annahmen und Parameter

4.2.1 Übersicht über die Szenarienstruktur

Die folgenden Szenarien werden im Modell PANTA RHEI quantifiziert. Sie unterscheiden sich in ihren Annahmen zu Extremwetterereignissen, Klimaschutz und Anpassung an die Folgen der Extremwetterereignisse (Tabelle 14).

Tabelle 14: Szenarien

	Szenario	Extremwetterereignisse	Klimaschutz	Anpassung
1	Referenz	Stand 2024	Politikstand 2020	Politikstand 2020
2	Extremwetterereignisse (EW)	Ja	Politikstand 2020	Politikstand 2020
3	EW und Anpassung (EWA)	Ja	Politikstand 2020	Ja
4	Klimaschutz (KS)	Stand 2024	Zielerreichung	Politikstand 2020
5	EW, A, KS	Ja	Zielerreichung	Ja
6	Sensitivität EW	Verstärkt	Politikstand 2020	Ja
7	Sensitivität Anpassung	Verstärkt	Politikstand 2020	Verstärkt
8	Sensitivität KS – Crowding-out	Stand 2024	Zielerreichung	Politikstand 2020

Quelle: GWS

Politikstand 2020 beim Klimaschutz bedeutet, dass die THG-Minderung bis 2030 nur 50% und im Jahr 2045 weniger als 80% im Vergleich zu 1990 beträgt und damit die Klimaziele nicht erreicht werden. Die Szenarien beruhen auf teils vereinfachten Abschätzungen und sind nicht als Prognosen zu interpretieren. Sie konzentrieren sich auf Teilaspekte, die quantifizierbar und bei den Gegenmaßnahmen, also Klimaschutz und Anpassung, durch Politik beeinflussbar sind. Es werden demnach nur abgeschätzte

Teileffekte des Klimawandels durch Extremwetterereignisse und der Anpassung daran berücksichtigt. Es gibt fünf Haupt-Szenarien und drei Sensitivitäts-Rechnungen.

- (1) **Referenz:** Szenario 1 bildet die Referenz, d.h. dieses Szenario ist die Vergleichsgrundlage oder auch der Basislauf. Hier wird unterstellt, dass sich der Klimawandel und Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung nicht weiter fortsetzen, sondern auf dem Stand von 2024 bzw. 2020 verbleiben. Die Klimaschutzziele werden verfehlt.
- (2) **Die Kosten von Extremwetterereignissen:** In Szenario 2 setzt sich der Klimawandel in Form von Extremwetterereignissen weiter fort, d.h. es werden die Klimawirkungen vermehrt und intensiver eintreten, die als unvermeidbar und auf Basis der Literatur als sehr wahrscheinlich angesehen werden und sich in quantitativen Größen im ökonomischen Modell abbilden lassen. Zudem werden zusätzlich zu den in den Abschnitten 2.1 und 2.2.3 angegebenen Investitionen keine weiteren bzw. zusätzlichen Klimaschutz- oder Anpassungsmaßnahmen getroffen. Die Differenz zwischen Szenario 2 und 1 bildet die Kosten von Extremwetterereignissen ab, die bis zum Jahr 2045 gegenüber heute zusätzlich auftreten. Es handelt sich in der Betrachtung also nicht um die gesamten Kosten des gut quantifizierbaren Klimawandels und noch weniger um die gesamten Kosten des Klimawandels.
- (3) **Klimawandelanpassung:** Szenario 3 unterstellt voranschreitende Extremwetterereignisse wie in (2) beschrieben und ausgewählte, wirksame und effiziente Maßnahmen in der Anpassung. Im Vergleich zu Szenario 2 lässt sich abschätzen, um wieviel sich die quantifizierbaren Kosten aus (2) verringern lassen und welche wirtschaftlichen Effekte die Anpassungsmaßnahmen mit sich bringen.
- (4) **Klimaschutz:** In Szenario 4 werden die reinen Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen im Vergleich zu Szenario 1 ausgewiesen. Der Klimawandel in Form von Extremwettern setzt sich nicht weiter fort, d.h. die Extremwetterereignisse und die damit verbundenen Schäden verbleiben von ihrer Höhe her auf dem historischen Stand von 2024 und es werden außer den bereits vorgeplanten Anpassungsmaßnahmen keine weiteren Ausgaben für Klimaanpassung getätigt. Es wird angenommen, dass die Klimaschutzinvestitionen zusätzlich erfolgen. Positive gesamtwirtschaftliche Effekte durch den vermiedenen Klimawandel werden nicht betrachtet.
- (5) **Folgen der quantifizierbaren Extremwetterereignisse und der Gegenmaßnahmen:** Dieses Szenario kombiniert alle Klimawandelkomponenten, d.h. die Extremwetterereignisse setzen sich fort und es werden sowohl zusätzliche Maßnahmen zum Klimaschutz als auch zur Klimaanpassung getroffen. Der Vergleich mit Szenario 1 zeigt die Gesamtwirkungen.
- (6) **Sensitivität Extremwetter:** Diese Sensitivitätsrechnung zeigt auf, was für Konsequenzen verstärkte Extremwetterereignisse haben. Die Erwartungen zur Erderwärmung und den daraus resultierenden Klimawandelereignissen beruhen auf Klimawandelmodellen, die annahmenbasiert sind. Durch Kaskadeneffekte oder nichtlineare Wirkbeziehungen beim bzw. kurz vorm Erreichen von Kipppunkten ist es möglich, dass die Klimaereignisse überproportional an Häufigkeit und Intensität zunehmen. Der nicht mehr abwendbare Klimawandel würde dann deutlich stärker ausfallen als erwartet. Diese Sensitivitätsrechnung trägt der

grundsätzlichen Unsicherheit zur Stärke der Extremwetterereignisse Rechnung. Es werden die Effekte verstärkter Extremwetterereignisse unter den gegebenen Maßnahmen zu Klimawandelanpassung ausgewiesen.

- (7) **Sensitivität Klimawandelanpassung:** Diese Sensitivitätsrechnung bezieht sich auf die verstärkten Extremwetterereignisse. Mit ihr wird ermittelt, wieviel zusätzliche Anpassungsmaßnahmen notwendig sind, um die zusätzlichen, in Deutschland beeinflussbaren Kosten verstärkter Extremwetterereignisse aufzufangen.
- (8) **Klimaschutz Zusätzlichkeit:** Da die Annahme zur Zusätzlichkeit der Klimaschutzinvestitionen eine zentrale Rolle für die Ergebnisse spielt, wird in der Sensitivität zu Szenario 4 angenommen, dass die Klimaschutzinvestitionen vollständig andere Investitionen verdrängen. Das Szenario wird mit der Referenz verglichen.

Bei der Szenariengestaltung stellt sich die sehr wichtige Frage der internationalen Bemühungen zum Klimaschutz, dadurch ausgelöste Änderungen beim Klimawandel und nicht zuletzt nach unterschiedlichen Anpassungsbemühungen. Weniger Anpassung im Ausland wird ceteris paribus zu höheren Effekten des Klimawandels in Deutschland führen. Ist der Klimaschutz in Deutschland stringenter als in anderen Ländern, droht die Gefahr von Produktionsverlagerungen, dem sogenannten carbon leakage. Für die oben genannten Szenarien liegt der Fokus auf den nationalen Wirkungen. Es wird international gleichgerichtetes Vorgehen angenommen. In den Szenarien 1 bis 3 hält sich auch die übrige Welt beim Klimaschutz zurück. In den Szenarien 4, 5 und 8 implementiert der Rest der Welt ähnliche Klimaschutzmaßnahmen. Ohne globale Modellierung ist allerdings unklar, was dies genau für den deutschen Außenhandel bedeutet. Deshalb bleiben die Modellannahmen zur Entwicklung der Importpreise und der Exportmengen in laufenden Preisen abgesehen von im Folgenden spezifizierten Unterschieden durch Extremwetterereignisse über alle Szenarien unverändert. Führt verstärkter Klimaschutz in Deutschland zu höheren Preisen, wirkt dies in den Szenarien negativ auf die Exporte. Verstärkter Klimawandel im Ausland führt zu höheren Importpreisen.

4.2.2 Szenarienmodellierung zur Darstellung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen

Klimaprojektionen, wie die des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2023), basieren auf Szenarien und Annahmen, deren Rahmen vom World Climate Research Programme (WCRP) vorgegeben werden. Auch die Repräsentativen Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCP) des IPCC resultieren aus komplexen Klimaprojektionen auf Basis des WCRP. Klimaprojektionen liefern keine konkreten Wettervorhersagen, sondern tendenzielle Einschätzungen zur zukünftigen Entwicklung des Klimas und damit verbundenen Extremwetterereignissen.

Nach Lange et al. (2020) nimmt die Fläche, die jährlich Extremwetterereignissen ausgesetzt ist, bei einer globalen Erwärmung von 2 Grad weltweit um mehr als das Fünffache zu. Diese Zunahme wird vor allem von Dürren und Hitzewellen getrieben, aber auch andere Extremwetterereignisse wie Überschwemmungen, Feuer oder Zyklone tragen dazu bei. 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.

Das erwartete Ausmaß der Erwärmung für Deutschland variiert je nach RCP-Szenario. Die RCP-Szenarien beschreiben verschiedene mögliche zukünftige Emissionspfade von Treibhausgasen und anderen klimawirksamen Substanzen. Sie dienen als Grundlage für Klimamodelle und -projektionen.

Die Extremwetterereignisse, welche sich nach derzeitigem Kenntnisstand mit dem Klimawandel in Deutschland in Verbindung bringen lassen, sind Starkregen, Hochwasser, Hitzewellen und Dürren (Trenczek et al. 2022c). Für Deutschland werden hinsichtlich der Extremwetterereignisse zukünftig folgende Trends erwartet (Brienen et al. 2020):

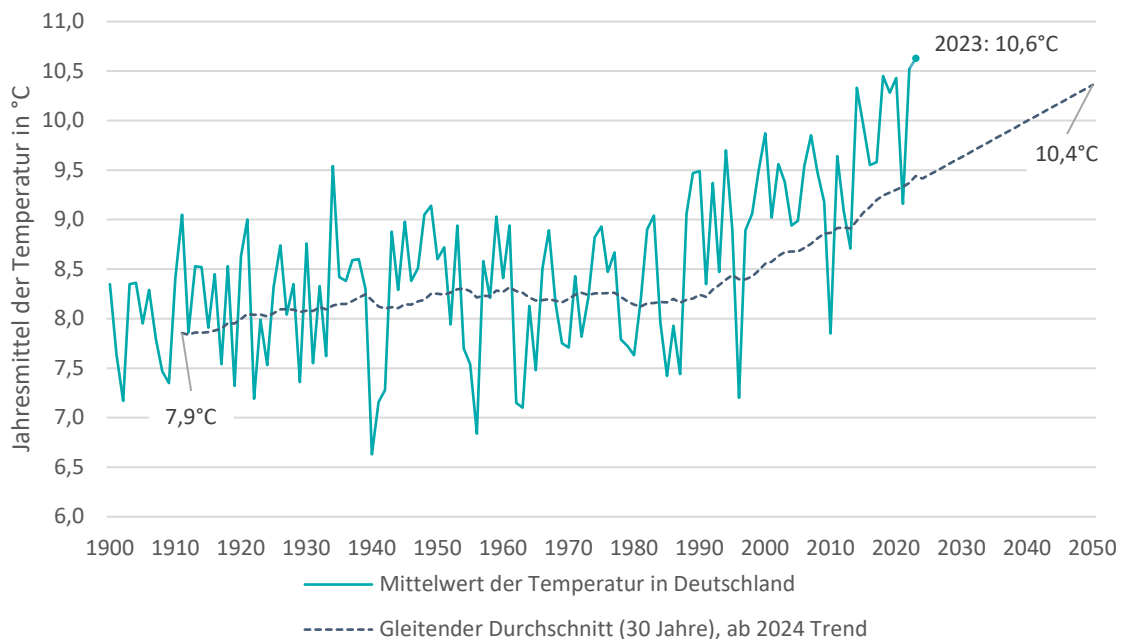
- Zunahme der Häufigkeit und Anstieg der Intensität von **Hitzewellen**
- Bestehende Trends zu **Niedrigwasserereignissen** verstärken sich voraussichtlich
- Deutliche Zunahme der Häufigkeit und der Intensität von **Starkregen**

Auf Basis der Klimaprojektionen für Deutschland ist also davon auszugehen, dass die Zahl der Extremwetterereignisse in Deutschland zunimmt – mit einer jeweils weiter steigenden Intensität der Schäden. Dies ist umso mehr der Fall, wenn Anpassungsmaßnahmen ausbleiben.

Die hier gesetzten Annahmen zum Klimawandel basieren nicht auf einem Klimamodell und legen auch keine exakten Klimawandelpfade zugrunde (vgl. Stöver et al. 2022). Vielmehr werden aus den zukünftig zu erwartenden Extremwetterereignissen Narrative zu den wirtschaftlichen Konsequenzen entwickelt und daraus Szenariogrößen abgeleitet, wodurch die Auswirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen auf wirtschaftliche und sozio-ökonomische Größen abgeschätzt werden kann. Dabei liegt der Fokus auf lokalen, in Deutschland auftretenden Effekte. Globale Effekte, die absehbar sehr starke Auswirkungen auf die deutsche Volkswirtschaft haben werden, werden indirekt über Bedingungen auf internationalen Absatzmärkten abgebildet.

Aus der Vergangenheit kann grundsätzlich für die Zukunft ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur abgeleitet werden (vgl. Abbildung 32). Setzt man den beobachteten Trend bis 2050 fort, lässt sich ein durchschnittlicher Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 2,5°C von 7,9°C auf 10,4°C beobachten. Das PIK prognostiziert eine Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 2031 bis 2060 von 10,5°C (PIK 2021), was den abgebildeten Trend widerspiegelt. Dieser Temperaturanstieg bis 2050 ist vergleichbar mit dem Temperaturanstieg des IPCC Szenarios SSP3-7.0 (obere Grenze) bzw. SSP5-8.5 (Mittelwert) (IPCC 2023a).

Abbildung 32: Jahresmittel der Temperatur in Deutschland von 1900 bis 2023



Quelle: DWD (2023), eigene Darstellung aus Wolter et al. (2024)

Basierend auf den für Deutschland zu erwartenden Extremwetterereignissen und der Literaturanalyse aus Abschnitt 3.1 wurden die Handlungsfelder und Wirkungskanäle für die Szenario-Modellierung des Klimawandels ausgewählt, für die sich valide und gesicherte Parameter ableiten lassen, die zukünftig durch den Klimawandel für Deutschland relevant sind und wahrscheinlich betroffen sein werden und für die sich monetäre Größen ableiten lassen. Fokus dieser Analyse sind die Wirkungen, die Kosten für Deutschland entfalten und Einfluss auf die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland nehmen. Gleichzeitig ist der Klimawandel ein globales Phänomen, wobei insbesondere der globale Süden bereits stark von den Auswirkungen betroffen ist. Global können bereits Einkommensverluste, eine Verschärfung der Ungleichheit, Migrationsbewegungen und Verluste im BIP festgestellt werden, die sich zukünftig abhängig von den Klimaschutzmaßnahmen zum Teil drastisch verschärfen könnten. Deutschland wird hiervon über die Nachfrage auf Absatzmärkten, Zuwanderung und Preise von Importprodukten betroffen sein. Durch den Einsatz eines nationalen Modells können diese im Ausland entstehenden Effekte für Deutschland nicht direkt dargestellt und angesprochen werden. Vielmehr findet eine indirekte Darstellung im Rahmen der Klimawirkungen „Ertragsausfälle in der Landwirtschaft“, „Nutzfunktion Holzertrag der Wald- und Forstwirtschaft“, „Fischerei“ sowie vor allem „Bedingungen auf internationalen Absatzmärkten“ statt.

Einige Schäden können durch die Auswahl der Klimawirkungen abhängig von Modellierung und Darstellbarkeit im Modellsystem jedoch gar nicht berücksichtigt werden: Insbesondere Schäden, welchen keine Geldwerte gegenübergestellt werden können, wie z.B. Tod, seelisches Leid, Verlust an Lebensqualität oder Artenvielfalt und Zerstörung von Kulturerbe, sind in der szenariobasierten Kostenberechnung nicht enthalten. Die Szenariorechnung stellt daher eine konservative Untergrenze dar.

Berücksichtigung finden die in Tabelle 10 dargestellten, für Deutschland zentralen Klimawirkungen:

- Ertragsausfälle in der Landwirtschaft
- Nutzfunktion Holzertrag der Wald- und Forstwirtschaft
- Fischerei
- Grundwasserstand und Grundwasserqualität in der Wasserwirtschaft
- Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen bei Niedrigwasser
- Bedingungen auf internationalen Absatzmärkten (Industrie und Gewerbe)
- Schäden an Gebäuden durch Starkregen und Hochwasser
- Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

Ertragsausfälle in der Landwirtschaft

Dem Narrativ folgend, dass der Klimawandel weltweit durch Hitze und Trockenheit zu Ertragsausfällen in der Landwirtschaft führt, wird für das Szenario unterstellt, dass die Importpreise für Landwirtschaftsprodukte bis 2045 um 15 % stärker steigen als in einer Welt ohne voranschreitenden Klimawandel. In der Literatur wurden Preissteigerungen in Höhe von 3 % bis 37 % genannt (Peter et al. 2020; Ren et al. 2018; Wang et al. 2018). Zudem wird auch ein Preisanstieg für Nahrungsmittelprodukte von knapp 4 % angenommen. Nahrungsmittelprodukte sind in der Produktion den Landwirtschaftsprodukten direkt nachgelagert und Agrarrohstoffe gehen neben Arbeitseinsatz, Maschineneinsatz, Energie und anderen Leistungen direkt in die Leistungserstellung der Nahrungsmittelindustrie ein. In Deutschland beträgt der anteilige Input von Agrarrohstoffen an der Produktion der Nahrungsmittelindustrie zwischen 21 % und 25 %. Eine Weitergabe der Preissteigerungen bei den Rohstoffinputs in Form von Preisanstiegen von Nahrungsmitteln ist sehr wahrscheinlich. Zudem wird angenommen, dass die Notwendigkeit zu importieren trotz der Preissteigerungen für importierte Produkte unverändert bleibt. Entsprechend werden die Mengenreaktionen auf die Preissteigerungen kompensiert. Die Importumsätze steigen dadurch um 8 % stärker. Zuletzt wird unterstellt, dass sich für die Landwirtschaft die Pachten für landwirtschaftliche Flächen erhöhen, da die Konkurrenz zwischen Industrie, Privathaushalten, Wohnungsbau und Natur um nutzbare Fläche zunimmt. Angelehnt an die Preissteigerungen beim Kaufwert je ha Landfläche in der jüngsten Vergangenheit (2015-2021 +53 %) nehmen auch die Leistungen zu, welche die Landwirtschaft vom Grundstücks- und Wohnungswesen bezieht. 2045 ergibt sich daraus eine Abweichung zwischen Referenz und Klimawandelszenario (Scen2_EW) in Höhe von 39 %.

Nutzfunktion Holzertrag der Wald- und Forstwirtschaft

Auch in der Wald- und Forstwirtschaft wird davon ausgegangen, dass die Klimafolgen global auftreten und sich die Preise für importierte Holzrohstoffe durch eine Angebotsverknappung infolge von Stürmen, Bränden, Trockenheit und Krankheitsbefall erhöhen werden. Wir unterstellen hier zunehmend ansteigende Aufschläge auf die Importpreise, sodass 2045 der Preis um +24 % höher liegt als in der Referenz. In der Vergangenheit (1995 bis 2021, ohne Sondereffekte durch den Ukrainekrieg) verzeichneten Importgüter der Wald- und Forstwirtschaft einen Preisanstieg von 88 %, sodass diese Annahme

vergleichsweise moderat ausfällt und damit auch der Unsicherheit in der Literatur Rechnung trägt. Die Wald- und Forstwirtschaft ist zudem wichtige Zulieferbranche für die Verarbeitung von Holzprodukten: sie liefert 7 % bis 10 % zum Output der Holzverarbeitenden Industrie zu. Infolge der Verflechtung wird ein zusätzlicher Preisanstieg bei weiterverarbeiteten importierten Holzprodukten bis 2045 in Höhe von 6 % angenommen. Die heimische Wald- und Forstwirtschaft muss zudem durch Baumschäden aufgrund von Schädlingsbefall, Trockenheit etc. höhere Summen abschreiben, da das Holz nicht mehr oder nicht mehr vollumfänglich einer ökonomischen Verwertung zu Verfügung stehen. Ohne Gegenmaßnahmen werden sich die Abschreibungen daher voraussichtlich verdoppeln. Zuletzt gilt auch für die Waldflächen dieselbe Konkurrenzsituation wie bei der Landwirtschaft. Die Folge ist auch hier ein deutlicher Aufschlag auf die bezogenen Leistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens in Höhe von 39 % bis 2045.

Fischerei

Fisch und Fischereiprodukte werden in Deutschland zum überwiegenden Teil importiert. Die Folgen des Klimawandels werden dadurch vor allem durch globale Klimawirkungen und Veränderungen in den Weltmeeren bemerkbar. Für die Szenariomodellierung wird angenommen, dass Fisch und Fischereiprodukte international knapper und damit teurer werden. Es wird unterstellt, dass der Importpreis bis 2045 um 32 % steigt. Er steigt damit um 25 % stärker als ohne Klimawandel zu erwarten gewesen wäre. Zur Einordnung: im Vergleichszeitraum 1997 bis 2023 sind die Importpreise für Fischereiprodukte um 90 % gestiegen, wobei die Preise während der Corona-Pandemie besonders stark gestiegen sind. Im Zeitraum von 1993 bis 2019 lag der Preisanstieg bei 57 %

Grundwasserstand und Grundwasserqualität in der Wasserwirtschaft

Im Zeitraum 2010 – 2019 stieg der volkswirtschaftliche Anteil des preisbereinigten Einsatzes von „Wasser und Dienstleistungen der Wasserversorgung“ an der preisbereinigten gesamtwirtschaftlichen Produktion bereits durchschnittlich um 2,1 % p.a. (Input-Output-Rechnungen des Statistischen Bundesamtes). Für die Szenariorechnung wird angenommen, dass durch zunehmende Hitze und Dürre als Folge des Klimawandels in den kommenden 30 Jahren eine Wachstumssteigerung von 0,3 % pro Jahr hinzukommt. Der anteilige Verbrauch von Wasser für die Leistungserstellung in der Wirtschaft bis 2045 steigt dadurch zusätzlich um 7 %. Diese grundsätzliche Bedarfssteigerung von Wasser deckt sich mit den Ergebnissen von Egerer et al. (2023), Bender et al. (2021) sowie Fliß et al. (2021). Es wird allerdings nicht nur angenommen, dass mehr Leistungen der Wasserwirtschaft nachgefragt werden, sondern auch, dass die Wasserwirtschaft die Art und Weise ihrer Leistungserstellung verändert. Mit Hitzewellen, Trockenheit und Starkregenereignissen steigen auch die Anforderungen an die Wasserbereitstellung und -aufbereitung (Bender et al. 2021). Um die Wasserqualität auch zukünftig gewährleisten zu können, werden Anpassungen an den Leitungen und der Wasserbereitstellung vorgenommen. Genauer nehmen der Einsatz von Strom, Baumaßnahmen und Verwaltung sowie Ingenieurleistung bis 2045 um 35 % bzw. 23 % für Letztere zu. Im Ergebnis wird also nicht nur mehr Wasser eingesetzt, sondern das auch zu höheren Herstellungspreisen. Von einem zusätzlichen Eingriff bei der Preissetzung der Wasserwirtschaft – z.B.

zur Verbesserung der Ertragslage der Unternehmen der Wasserwirtschaft angesichts der knappen Ressource Wasser – wurde abgesehen.

Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen bei Niedrigwasser

Die Schifffahrt wird infolge des voranschreitenden Klimawandels im Sommer immer häufiger mit Niedrigwasser konfrontiert sein (Voß et al. 2021; Nilson et al. 2020; Hänsel et al. 2020), sodass die eingegangenen Lieferverpflichtungen nicht eingehalten werden können. Wir unterstellen, dass die Schifffahrt als Gegenreaktion zunehmend Leistungen des Großhandels in Anspruch nimmt. Dies hat zur Folge, dass sich die Leistungen der Binnenschifffahrt verteuern werden. Im Detail wird für die Parametereinstellung im Szenario angenommen, dass sich im Kontext der industriellen Verflechtungen die bezogenen Großhandelsleistungen bis 2045 um den Faktor 2,3 erhöhen.

Bedingungen auf internationalen Absatzmärkten (Industrie und Gewerbe)

Der Klimawandel und seine Folgen sind ein global auftretendes Phänomen, sodass davon auszugehen ist, dass es weltweit zu Beeinträchtigungen in der Produktion von produzierenden Wirtschaftszweigen sowie im Transport der Waren 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. Zudem entstehen Handelshemmnisse durch Unterbrechungen von Lieferketten und Einschränkungen bei Handelswegen, die sowohl Menge als auch Preise der gehandelten Waren negativ beeinflussen. Damit verbundene Preissteigerungen von importierten Vorleistungen erhöhen die heimischen Produktionskosten und damit die Absatzpreise, sodass sich die internationale Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Industrie verringert. Insgesamt geht somit also auch der Export von Deutschland zurück. Insgesamt wird unterstellt, dass sich infolge der globalen Klimafolgen die durchschnittlichen jährlichen Preissteigerungen von Importgütern der Branchen 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 22 Jahre annähern. Im Durchschnitt steigen die oben genannten Importpreise dadurch um 0,8% p.a. und liegen damit 0,4 Prozentpunkte über der gemittelten durchschnittlichen jährlichen Preissteigerung der Referenz. 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 2045 langsam reduzieren. 2045 liegt die exportierte Menge 0,23% unter der ursprünglich angenommenen Entwicklung. Massive Verwerfungen durch ein starkes Absinken der globalen Einkommen, wie sie neue klimaökonomische Studien nahelegen, oder andere starke Effekte wie das Überschreiten von globalen Klimakipppunkten,

würden sich absehbar erheblich auf die Bedingungen auf internationalen Absatzmärkten auswirken, können aber im Rahmen des Studiendesigns nicht dargestellt werden.

Schäden an Gebäuden durch Starkregen und Hochwasser

Im Rahmen von Flaute et al. (2022) wurde bereits auf die Herausforderungen und Unsicherheiten in der Bestimmung der Gebäudeschäden durch Starkregen und Hochwasser eingegangen. Die Herangehensweise sieht vor, die genaue Art der Schäden an Gebäuden und Infrastruktur nicht weiter zu spezifizieren, sondern eine Gesamtsumme über alle Ereignisse zu ermitteln und zur Verstetigung über den gesamten Betrachtungszeitraum zu verteilen. Es wird angenommen, dass Versicherungen, Unternehmen und Haushalte in Unkenntnis des genauen Zeitpunkts und Umfangs von Starkregen- und Hochwasserereignissen und unabhängig davon, ob das Ereignis überhaupt eintritt, Rücklagen bilden, um eventuell anfallende Schäden beheben bzw. ausgleichen 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. Durch die Rückstellungen bzw. das vermehrte Ansparen wird dem Wirtschaftskreislauf Geld entzogen. In den Parametereinstellungen erfolgt dies über Abschreibungen: Es wird angenommen, dass die Versicherungswirtschaft ihre Abschreibungen bis zum Jahr 2045 fast verdoppelt, wodurch die Abschreibungen im Jahr 2045 mit 40 % um ca. 2,2 Mrd. Euro höher liegen als in der Referenz. Das Grundstücks- und Wohnungswesen erhöht die Abschreibungen gegenüber einer Entwicklung ohne voranschreitenden Klimawandel um 1,5 % auf ca. 6 Mrd. Euro, was einem Zuwachs zwischen 2024 und 2045 von 86 % entspricht. Dies ist auch als eine Reduktion der Lebensdauer aller Gebäude um zwei Jahre interpretierbar. Die privaten Haushalte wiederum reduzieren ihren Konsum um 0,1 % im Vergleich zur Referenz, um in Form von Ersparnissen Rückstellungen zu bilden und auf Gebäudeschäden vorbereitet zu sein. Dies entspricht aufsummiert bis 2045 einer Zunahme in der Ersparnis von 11,5 Mrd. Euro. Schließlich wird unterstellt, dass Unternehmen ihre Abschreibungen bis 2045 um 0,15 % erhöhen.

Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

Die Szenario-Einstellungen zu Auswirkungen auf das Gesundheitssystem stellen ausschließlich auf hitzebedingte Krankenhauskosten ab. Die Parameter werden auf Basis der zusätzlichen Krankenhaustage pro Hitzetag (Karlsson & Ziebarth 2018), der durchschnittlichen Kosten eines Krankenhaustages (StBA 2021) sowie die für die Zukunft projizierten heißen Tage pro Jahr (Pfeifer et al. 2020) ermittelt. Dabei wird ein linearer

Zusammenhang zwischen zusätzlichen heißen Tagen und zusätzlichen Krankenhaustagen unterstellt. Unter der Annahme, dass vor allem Ältere ab 65 Jahren von hitzebedingten Krankenhauseinweisungen betroffen sind, ergibt sich für 2045 eine demografisch bedingte Steigerung der hitzebedingten Krankenhauseinweisungen um 46 %. Als durchschnittliche Kosten eines Krankenhaustages in Deutschland wurden die durchschnittlichen Kosten je Behandlungsfall durch die durchschnittliche Verweildauer geteilt und bis 2045 fortgeschrieben (StBA 2021). Für die Entwicklung der heißen Tage werden 5,8 zusätzliche Heiße Tage für das Jahr 2045 angenommen (Pfeifer et al. 2020). Daraus ergibt sich ein Zuschlag bis 2045 von etwa 13 Euro pro Kopf (0,07 % pro Kopf), was insgesamt rund 310 Millionen Euro im Jahr 2045 entspricht. Die zusätzlichen Ausgaben im Gesundheitssystem, von denen unterstellt wird, dass sie überwiegend dem Staat zufallen, werden durch Einsparmaßnahmen bei anderen staatlichen Leistungen ausgeglichen.

Neben den Krankenhauseinweisungen gibt es noch zahlreiche weitere Effekte des Klimawandels auf die Gesundheit: Verletzungen durch hitzebedingte Unkonzentriertheit, hitzebedingte Krankheiten, durch Vektoren²³ übertragenen Krankheiten, Angstzustände, Depressionen oder posttraumatischen Belastungsstörungen u.v.m. Zudem entstehen Kosten durch medizinische Notdienste, Rettungseinsätze und den Wiederaufbau der Gesundheitsinfrastruktur nach extremen Wetterereignissen. Auch Produktivitätsverluste aufgrund von Krankheit, Hitzestress oder Behinderung, die durch Klimawandelfolgen ausgelöst werden, nehmen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Beschäftigten. Allerdings gibt es nur wenige Studien, die sich mit den quantitativen Folgen befassen haben (Wolf et al. 2021a), weshalb auch in der KWRA 2021 nur Wirkpfade skizziert wurden. Um das Verständnis über die weiteren ökonomischen Kosten von klimawandelbedingten Gesundheitsschäden zu vertiefen, haben Reuschel & Stöver (2024) eine Sensitivitätsanalyse zu verminderter Leistungsfähigkeit bei Allergikern sowie Hitzestress bei der Arbeit und deren Auswirkungen auf die Produktivität durchgeführt. In der Analyse zeigte sich, dass abhängig von den Annahmen hohe zusätzliche Kosten entstehen könnten, deren Umfang aber noch nicht valide gesichert sind. Es werden deshalb hier keine weiteren Annahmen und Einstellungen zur Gesundheit vorgenommen.

4.2.3 Szenarienmodellierung zur Darstellung der vereinfachten Abschätzung von Anpassung an Extremwetterereignisse

Die Kosten der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen lassen sich durch Anpassungen an die Klimawirkungen reduzieren. Die Anpassungsmaßnahmen aus Tabelle 7 bilden dabei die Grundlage für die im Szenario Extremwetterereignisse und Klimawandelanpassung umgesetzten Anpassungen an den Klimawandel (Scen3 EWA). Die dort angegebenen Maßnahmen wurden den DAS-Handlungsfeldern zugeordnet und zusammen mit abgeschätzten Umsetzungshorizonten in Tabelle 15 zusammengefasst. Zur Darstellung der Wirkungen der avisierten Anpassungsmaßnahmen in der

²³ Vektoren sind Organismen, die Krankheitserreger übertragen (z.B. Zecken oder Stechmücken). Durch Klimaänderungen können sich z.B. Verbreitungsgebiete, Aktivitätszeiträume oder Populationsstärken der Vektoren und sogenannter Reservoirtiere (Tiere, in denen sich Erreger vermehren, die selbst aber keine Krankheitserreger übertragen) verändern.

Szenarioanalyse werden diese ebenfalls in Parameter übersetzt. Dazu wurden mehrere Annahmen getroffen:

- Die Klimaschäden treten bis zur vollständigen Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen unverändert ein, d.h. bis zur Umsetzung entstehen Schäden wie im Szenario Extremwetter ermittelt (Scen2 EW). Der Umsetzungshorizont entspricht dabei der letzten Spalte in Tabelle 15. Es wird angenommen, dass die bis dahin umgesetzten Veränderungen in der Produktionsstruktur bzw. Preisanpassungen auch nach Wirksamwerden der Anpassungsmaßnahme unverändert bestehen bleiben. Andere Schäden wie z.B. Abschreibungen oder Gesundheitskosten, gehen mit Eintreten der Anpassung langsam auf ihren Ursprungspfad zurück. Dies bedeutet, dass die bis dahin aufgetretenen Schäden noch länger nachwirken.
- Mit der vollständigen Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen wirken die Anpassungen im Inland vollumfänglich. Dabei wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Folgen von inländischen Extremwetterereignissen durch die Maßnahmen so weit eingedämmt werden, dass die monetären Kosten, die ohne Anpassungsmaßnahmen durch die hier unterstellten quantifizierbaren Folgen von Extremwetterereignissen entstehen würden, vollständig aufgefangen werden können. Grundlage dafür bilden die Kosten-Nutzen-Werte aus Tabelle 7. Zu bedenken ist dabei, dass mit den Anpassungsmaßnahmen nur die hier berücksichtigten inländischen Klimafolgen adressiert werden können. Vielmehr gaben die hier geschätzten Klimakosten den Richtwert zur Bestimmung der Investitionshöhe vor, die nötig sind, um rechnerisch mit dem Kosten-Nutzen Wert den Schaden auszugleichen. Dies bedeutet, dass nicht zwangsläufig alle Schäden tatsächlich verhindert werden können. Wie bei der Bestimmung der Klimaschäden stellt dies also eine Annäherung dar. Es handelt es sich also nicht um die vollumfängliche Bestimmung tatsächlich real anfallender zusätzlicher Anpassungskosten, sondern stellt eine Abstraktion der sonst regional sehr spezifischen Maßnahmen dar. Dennoch wird es durch die Annäherung möglich, die Wirkungsrichtung und den Wirkungsumfang von Anpassungsmaßnahmen abzuschätzen.
- Es werden nur Anpassungsmaßnahmen im Inland umgesetzt. Das heißt, dass es auch nur Anpassungen an heimische Klimawirkungen gibt. Kosten und Negativeffekte auf heimische Branchen, die durch Klimafolgen im Ausland entstehen, bleiben daher unverändert. Dies ist bei allen Klimawirkungen der Fall, für die infolge des Klimawandels höhere Importpreise zu erwarten sind. In Tabelle 15 sind für Internationalen Handel und Fischerei keine Anpassungsmaßnahmen angegeben, da die Klimafolgen und ihre Auswirkungen für die inländische Industrie ausschließlich im Ausland entstehen.
- Insgesamt werden bis 2045 Investitionen in Höhe von 32 Mrd. Euro getätigt. Mit 85% entfällt der größere Teil auf die Bauinvestitionen, nur 15% werden den Ausrüstungsinvestitionen zugerechnet. Über den gesamten Betrachtungszeitraum bleibt dieses Verhältnis unverändert.

Tabelle 15: Anpassungsmaßnahmen nach DAS-Handlungsfeldern und durchschnittlicher Umsetzungszeit

DAS-Handlungsfeld	Anpassungsmaßnahme	Horizont (Jahre)	Horizont (Mittel)
Landwirtschaft	Anpassung an Hitzephasen	5	3,4
	Renaturierung	5	
	Maßnahmen zur Erhöhung der Wassereffizienz	1	
	Bodenschutz durch Matten	1	
	Frühwarnsysteme & Informationsdienste	5	
Wald- und Forstwirtschaft	Anpassung an Hitzephasen	5	3,4
	Renaturierung	5	
	Maßnahmen zur Erhöhung der Wassereffizienz	1	
	Bodenschutz durch Matten	1	
	Frühwarnsysteme & Informationsdienste	5	
Gebäude und Infrastruktur	Gründächer	1	6,2
	Renaturierung	5	
	Klimaangepasste Raumplanung	5	
	Hochwasserschutz	15	
	Frühwarnsysteme & Informationsdienste	5	
Internationaler Handel / Fischerei	----		
Binnenschifffahrt	Niedrigwasserschutzmaßnahmen	5	5
	Frühwarnsysteme & Informationsdienste	5	
Gesundheit	Anpassung an Hitzephasen	5	4,2
	Renaturierung	5	
	Klimaangepasste Raumplanung	5	
	Freiflächenbegrünung	1	
	Frühwarnsysteme & Informationsdienste	5	
Wasserwirtschaft	Niedrigwasserschutzmaßnahmen	5	5,6
	Anpassung an Hitzephasen	5	
	Renaturierung	5	
	Maßnahmen zur Erhöhung der Wassereffizienz	1	
	Bodenschutz durch Matten	1	
	Frühwarnsysteme & Informationsdienste	5	

Quelle: eigene Darstellung

4.2.4 Szenariomodellierung zum Klimaschutz

Für die Modellierung des Klimaschutzes wird das Modell PANTA RHEI mit Daten zum Energiesystem aus den Bottom-up-Modellen gekoppelt. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die übergebenen Parameter. Zentral sind hierbei die zusätzlichen Investitionen in entsprechende Klimaschutzmaßnahmen, die als Differenz zur Referenzentwicklung in den Bottom-up-Modellen ermittelt (siehe Abbildung 5) und in PANTA RHEI eingestellt werden. Diese werden zunächst als vollständig zusätzlich zu den Ohnehin-Investitionen angenommen, d. h., dass es keine Restriktionen über den Kapitalmarkt gibt. Diese Annahme ist mit entscheidend für die positiven Effekte im Klimaschutzszenario, die den oberen Rand der zu erwartenden Effekte abbilden. Mit Blick auf die Entwicklung der Wachstumszerlegung im Klimaschutzszenario, wo der Beitrag des Faktors Kapital nicht über historisch beobachtete Größenordnung hinausgeht, internationale Studien etwa der

OECD, die regelmäßig höhere Investitionen in Deutschland anmahnen, die hohen Vermögen der Privaten Haushalte und der Unternehmen insgesamt, die Gestaltung der Geldpolitik in der Eurozone, sowie die günstigen Finanzierungsbedingungen staatlicher Akteure wie der KfW, die die Energiewende zu sehr günstigen Konditionen finanzieren können, gibt es viele Gründe, die für die Annahmen sprechen. Umgekehrt ist auch klar, dass viele einkommensschwache Haushalte derzeit keine zusätzlichen Ausgaben für die Energiewende erbringen können und auf staatliche Förderung angewiesen sind. Es werden auch nicht alle Unternehmen über die notwendigen Mittel verfügen. Die Zusätzlichkeit hängt mit von der allgemeinen Auslastung des Produktionsapparats ab. Sie wird in Zeiten des konjunkturellen Booms niedriger ausfallen und mit der Höhe der in einem Jahr zusätzlich getätigten Investitionen zurückgehen.

Entsprechend dem unterlegten Roadmap-Szenario wird auch angenommen, dass keine vorzeitigen Abschreibungen des Kapitalbestandes vorgenommen werden. Eine Ausnahme bilden vorzeitige Außerbetriebnahmen von Gasheizungen ab 2041, deren Erfassung aber schwierig wäre. Der Investitionsimpuls verursacht eine zusätzliche Nachfrage, um die Klimaschutzmaßnahme umzusetzen. Dabei muss zwischen den Wirtschaftsbereichen, die die Investition tätigen (z. B. die Zementindustrie, die eine CCS-Anlage kauft), und den Wirtschaftsbereichen, die die Investition erhalten, um entsprechende Güter zu produzieren und Dienstleistungen bereitzustellen (z. B. der Maschinenbau-Sektor, der CCS-Anlagen herstellt), unterschieden werden.

In PANTA RHEI werden die Bruttoanlageinvestitionen getrennt für Ausrüstungen, Bauten und sonstige Anlagen (insbesondere in Form von geistigem Eigentum) modelliert. Auf Ebene der Wirtschaftsbereiche werden sie in Abhängigkeit der jeweiligen Produktion geschätzt und für einzelne Wirtschaftsbereiche wird zusätzlich der Kapitalstock und ein Zeittrend als erklärende Größen einbezogen. Die im Klimaschutzenszenario höheren Investitionen erhöhen unmittelbar die Nachfrage und damit das Bruttoinlandsprodukt. In den Folgejahren sind damit höhere Abschreibungen verbunden, welche die Kosten der Branchen erhöhen, die deshalb ceteris paribus ihre Preise anheben.

Im Modell ergibt sich, dass die Produktion in Wirtschaftsbereichen bis etwa 2035 in ähnlichem Umfang wie die Investitionen steigen, so dass zunächst die Stückkosten nicht überdurchschnittlich zunehmen, sondern die hohen Abschreibungen auf hohe Produktionsmengen treffen. Die Kapitalproduktivität sinkt daher zunächst nicht. In späteren Jahren sinkt die Kapitalproduktivität in Wirtschaftsbereichen, die viel in die Energiewende investiert haben, wobei gleichzeitig auch die Energiekosten niedriger sind.

Für die Interpretation der Ergebnisse ist wichtig, dass die höchsten Klimaschutzinvestitionen (Abbildung 5) in der Energiewirtschaft getätigt werden, für die diese Zusammenhänge im Strommarktmodell abgebildet sind. Bei den hohen Investitionen liegen die Strompreise für die Industrie im Klimaschutzenszenario höher als in der Referenz, wo die Differenz nach 2035 deutlich sinkt. Die Zusammenhänge sind damit andere als in den übrigen Wirtschaftsbereichen.

Tabelle 16: Übersicht über die in PANTA RHEI eingestellten Parameter aus der Energiesystemmodellierung

Variable	Werte	Einstellung in PANTA RHEI
CO ₂ -Preise	Siehe Tabelle 2	Exogen vorgegebene Preise, die auf die Endverbraucherpreise fossiler Energieträger aufgeschlagen werden
Energieimportpreise	Veränderung 2023–2045: Rohöl: +25,1 % Steinkohle: +14,4 % Erdgas: -35,6 %	Exogen vorgegebene Preise, die die Inlandspreise beeinflussen (in allen Szenarien identisch)
Strompreise	Siehe Tabelle 4	Überschreiben der in PANTA RHEI vereinfacht (d.h. ohne explizite Strommarktmodellierung) ermittelten Strompreise für Industrie, GHD und private Haushalte
Zusätzliche Investitionen	Siehe Abbildung 5: Energiewirtschaft: Investitionen in Ausrüstungen und Bauten Private Haushalte: Gebäudehülle: Bauinvestitionen, Wärmeerzeuger und E-Fahrzeuge: Privater Konsum GHD: Gebäudehülle: Bauinvestitionen, Rest: Ausrüstungen Industrie: Investitionen in Ausrüstungen und Bauten Verkehr: Investitionen in Ausrüstungen (auch Fahrzeuge) und Bauten	Aufschlag auf die modellendogen ermittelten Investitionen in Ausrüstungen und Bauten nach investierenden Wirtschaftsbereichen oder Ausgaben der privaten Haushalte (nur in der Sensitivität zum Crowding-out vollständige Verdrängung anderer geplanter Investitionen)
Energieverbrauch	Siehe Abbildung 7 bis Abbildung 12	Überschreiben der in PANTA RHEI vereinfacht ermittelten Energieverbräuche in PJ nach Energiebilanz, die dann auch auf monetäre Größen übertragen werden

Quelle: eigene Darstellung

Für das Klimaschutzszenario sind neben höheren Investitionen auch höhere CO₂-Preisen notwendig (siehe Tabelle 2), welche die Höhe der Energiepreise beeinflussen und damit zu Kosten- und Preissteigerungen, insbesondere in energieintensiven

Wirtschaftsbereichen, führen. Höhere Energiepreise wirken sich zunächst negativ auf die betroffenen Wirtschaftsbereiche und auch die privaten Haushalte aus, d. h. Produktion bzw. Konsum liegen dadurch niedriger als in der Referenz. Die höheren Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung fließen in den Staatshaushalt und werden nicht zurückgegeben. Sie dienen aber zur Finanzierung der höheren staatlichen Investitionen, wobei die Höhe der Differenzinvestitionen nicht von den CO₂-Einnahmen abhängt. Der Finanzierungssaldo des Staates nach VGR resultiert im Modell aus höheren Einnahmen, höheren auch staatlichen Investitionen auf der Ausgabenseite und einer verbesserten allgemeinen Wirtschaftslage, die wiederum zu höheren Einnahmen und niedrigeren Ausgaben des Staates führt.

Der Faktoreinsatz von Arbeit, Kapital und Energie wird auf der Ebene der Wirtschaftszweige ermittelt. Geänderte Investitionen und Preise ändern auf Ebene der Wirtschaftsbereiche die Bruttoproduktion und die Güterpreise, sodass auch die Arbeitsnachfrage reagiert. Die Arbeitsnachfrage je Wirtschaftsbereich nach den Daten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen wächst mit der Produktion und sinkt mit einem höheren bereichsspezifischen Lohnsatz in Relation zum Preis des Wirtschaftsbereichs. Der (erwartete) Lohnsatz wird zunächst gesamtwirtschaftlich in Abhängigkeit von Arbeitsproduktivität, der Entwicklung der Verbraucherpreise und der Erwerbslosenquote bestimmt. Anschließend werden Lohnentwicklungen nach Wirtschaftsbereichen als Funktion des gesamtwirtschaftlichen Lohnsatzes und bereichsspezifischer Entwicklungen fortgeschrieben. Am Jahresende wird der gesamtwirtschaftliche Stundenlohnsatz noch einmal aus tatsächlich erzielten Jahreslohnsummen und Jahresarbeitszeiten nachberechnet, um Konsistenz zu den sektorspezifischen Löhnen zu gewährleisten. Unterschiedliche Qualifikationen werden nicht berücksichtigt. Die Löhne wiederum sind zentraler Bestandteil der verfügbaren Einkommen und damit des Konsums der privaten Haushalte. Die Energienachfrage wird an die Ergebnisse der Energiesystemmodellierung angepasst. Die Änderungen der Energienachfrage im Klimaschutzszenario fallen im Energiesystemmodell größer aus, als dies in PANTA RHEI bei entsprechenden CO₂-Preisen der Fall wäre. Im Modell ist das vor allem als autonome Steigerung der Energieeffizienz sowie als starker Energieträgerwechsel abgebildet, was einen Teil der positiven gesamtwirtschaftlichen Effekte erklärt. In Anlehnung an eine Produktionsfunktion reagieren somit Kapital-, Arbeits- und Energieeinsatz auf die Klimaschutzmaßnahmen.

Die Fortschreibung der strukturellen Änderungen zwischen den Wirtschaftszweigen erfolgt zum einen über Inputkoeffizienten, die jeweils den Anteil des Vorleistungseinsatzes einer Gütergruppe bei der Produktion eines Produktionsbereiches angeben. Die Veränderung der wichtigsten Inputkoeffizienten in konstanten Preisen wird in Schätzungen mittels eines Zeittrends erklärt, der u. a. den technologischen Fortschritt abbildet. Die Endnachfrage in der Input-Output-Tabelle ist mit der Inlandsproduktberechnung verbunden, deren strukturelle Veränderungen sich aufgrund von empirisch gemessenen Verhaltensänderungen entwickeln. Beispielsweise zeigt sich die Digitalisierung sowohl in den veränderten Einsatzverhältnissen von IT-Dienstleistungen bei den Produktionsbereichen als auch bei den Investitionen (anteilig mehr geistiges Eigentum) und den Konsumverwendungen privater Haushalte (mehr IT-Dienstleistungen, z. B. Streaming). Die Koeffizienten der energetischen Vorleistungen werden mittels eines separaten Ansatzes in die Zukunft projiziert: Hierfür werden sie anhand der Energieverbräuche im Verhältnis

zum preisbereinigten Produktionswert fortgeschrieben, um den Einfluss des Energieverbrauchs und des Energiemixes auf die Kostenstruktur der Unternehmen abzubilden. Sie werden konsistent zu den Ergebnissen der Energiesystemmodellierung jeweils in der Referenz und im Klimaschutzszenario fortgeschrieben. Sie unterscheiden sich somit zwischen Referenz- und Klimaschutzszenario. Alle übrigen preisbereinigten Koeffizienten sind in beiden Szenarien gleich.

4.2.5 Sensitivitätsrechnungen: Verstärkte Extremwetterereignisse (Scen6) und verstärkte Investitionen in Anpassung (Scen7)

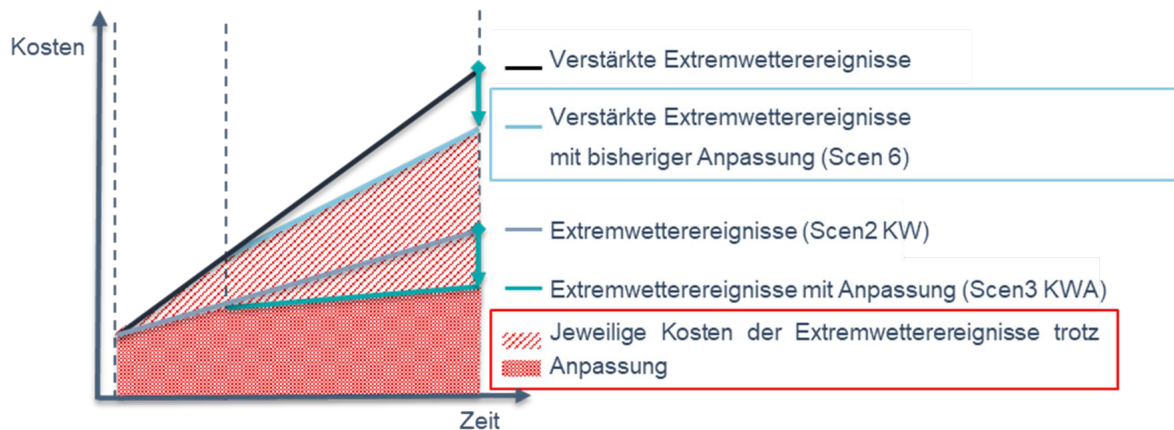
Die exakte Ausprägung des Klimawandels, also die genaue Häufigkeit, das Ausmaß und die Intensität der Extremwetterereignisse, ist ungewiss. Daher wird ergänzend mit Szenario 6 eine Sensitivität gerechnet, in welcher die in der Modellierung abgebildeten quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen deutlich stärker verlaufen als im Extremwetterszenario (Scen2 KE) angenommen. Dies könnte sich z.B. dadurch ergeben, dass der Klimaschutz weltweit weniger ambitioniert umgesetzt wurde.

Für die Sensitivitätsrechnung verstärkte Extremwetterereignisse wird eine Verdoppelung der in Scen2 EW unterstellten direkten Folgen von Extremwetter angenommen. Die quantifizierten, direkten Folgen der Extremwetterereignisse gehen als Input in die gesamtwirtschaftliche Modellierung ein, alle gesetzten Input-Parameter werden also verdoppelt. Aus den Ergebnissen lässt sich anschließend ablesen, ob sich die extremwetterbedingten Kosten linear mit verdoppeln oder ob es durch die indirekten und induzierten Effekte zu einer verstärkten Wirkung kommt. Zudem lässt sich zeigen, um wieviel sich die Wirkung der Anpassungsmaßnahmen reduziert.

Hinsichtlich der Anpassungsmaßnahmen wird bei verstärkten Extremwetterereignissen (Scen6) angenommen, dass die ursprünglich zusätzlich geplanten Maßnahmen weiterhin die unterstellten inländisch verursachten Schadenskosten aus Scen2 EW verhindern. Die Anpassungsmaßnahmen reichen also weiterhin aus, um einen Teil der Klimawirkungen zu begrenzen und werden nicht vollständig nutzlos. Um die verbleibenden, nun größeren Teile der inländisch verursachten Schäden vollständig verhindern zu können, müssen die Investitionen in die Anpassungsmaßnahmen erhöht werden. Die Wirkung daraus wird in Scen7 quantifiziert. Die Vorgehensweise bzw. Parametersetzung bei der Anpassung erfolgt wie bei Scen3 EWA.

Es gelten für die beiden Sensitivitäten die oben gemachten Einschränkungen für die Eingangsgrößen und insbesondere auch, dass es keine Prognosen sind. Es geht vor allem um das Herausarbeiten von Wirkungsrichtungen und Größenordnungen. Das Zusammenspiel der unterschiedlichen Szenarien und der damit verbundenen Schadenssummen und Annahmen ist in Abbildung 33 dargestellt.

Abbildung 33: Zusammenwirken von Extremwetterereignissen und Anpassung daran in den unterschiedlichen Szenarien- schematische Darstellung



Quelle: eigene Darstellung.

4.2.6 Sensitivitätsrechnung: Keine Zusätzlichkeit der Klimaschutzinvestitionen (Scen8 KS)

Wie in Abschnitt 3.3.3 dargestellt, ist die Annahme zur Zusätzlichkeit von Klimaschutzinvestitionen wichtig für die gesamtwirtschaftlichen Effekte. In den Szenarien wird grundsätzlich angenommen, dass diese Investitionen zusätzlich erfolgen werden (siehe Abschnitt 4.2.4). Szenario 8 unterstellt hingegen, dass die Klimaschutzinvestitionen andere Investitionen komplett verdrängen, es also zu einem vollständigen Crowding-out kommt. Und im Fall niedrigerer Investitionen zum Ende des Betrachtungszeitraums wird auch ein Crowding-in unterstellt, was bedeutet, dass mehr sonstige Investitionen getätigt werden. Diese Sensitivität beschreibt damit im Rahmen der Szenarienbetrachtung eine Untergrenze der zu erwartenden Effekte des Klimaschutzes.

Die Höhe des Crowding-out wird u. a. durch die Höhe der Investitionen in der Referenz sowie die Auslastung des Produktionsapparats bestimmt. Angesichts des im Jahr 2024 geringen Wirtschaftswachstums dürfte die Gefahr von Crowding-out derzeit begrenzt sein, auch wenn auf dem Arbeitsmarkt nicht alle freien Stellen besetzt werden können. Die gesamtwirtschaftliche Investitionsquote Deutschlands ist im internationalen Vergleich nicht hoch und internationale Institutionen wie die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) und der Internationale Währungsfonds (IWF) mahnen regelmäßig höhere Investitionen in Deutschland an. Der Sachverständigenrat (2023) geht davon aus, dass die digitale und grüne Transformation zu deutlichen Abweichungen bisheriger Trends bei den Produktionsfaktoren führt. Er spricht sich für erhöhte Investitionen aus, um das langfristige Wachstumspotenzial zu stärken. Die Analyse von Burret et al. (2021) beschäftigt sich intensiv mit den für die Transformation notwendigen Investitionen und einem möglichen Crowding-out. Danach sind deutliche Mehrinvestitionen möglich und ihre Finanzierung ist gewährleistet. Die Möglichkeit höherer Investitionen wird somit von verschiedenen Seiten gesehen. Die in Abschnitt 2.1.4 ermittelten Klimaschutzinvestitionen liegen eher am oberen Rand, aber noch in dem Bereich der vom Sachverständigenrat (2023, S. 111) genannten Umstellungsinvestitionen für die grüne Transformation, wobei dort nur energieintensive Wirtschaftszweige und die

Energieversorgung betrachtet werden. Nach einer Literaturrecherche von Burret et al. (2021) müssen zwischen 43 und 82 Mrd. Euro jährlich für den Klimaschutz bis 2045 investiert werden, wobei vier von fünf betrachteten Studien in einer Spanne von 43 bis 58 Mrd. Euro liegen. Das Handelsblatt Research Institute (HRI 2024) kommt in einer Analyse von Prognosen und Studien ebenfalls zu einem hohen Investitionsbedarf für die Energiewende.

Die Klimaschutzinvestitionen, die sich aus Maßnahmen ergeben, die nach 2020 umgesetzt wurden, konzentrieren sich auf die privaten Haushalte sowie Erzeugung und Infrastruktur der Energiewirtschaft. In den Bereichen GHD, Industrie und Verkehr machen sie jährlich nur niedrige einstellige Milliardenbeträge aus. Für die privaten Haushalte lässt sich festhalten, dass sie insgesamt über sehr hohe Geldvermögen verfügen, diese allerdings ungleich verteilt sind. Fast die Hälfte der privaten Haushalte verfügt nur über geringe oder keine Nettovermögen (Deutsche Bundesbank 2023). Eigentümer können Kosten der Sanierung und neuer Heizungen auf die Mieter umlegen. Zusätzlich gibt es Förderungen des Bundes von 30–70 % für neue CO₂-arme Heizungen und KfW-Kredite mit Zuschüssen für die Gebäudesanierung. Förderungen gibt es auch für Nichtwohngebäude (GHD-Bereich). Die Maßnahmen im Gebäudebereich führen zu niedrigeren Betriebskosten. Es ist zu erwarten, dass viele Eigentümer die Investitionen zusätzlich leisten werden, weil sie zukünftig niedrigere laufende Ausgaben erwarten. Bei Haushalten mit niedrigen Einkommen und auch bei den staatlichen Zuschüssen ist angesichts der Budgetgrenze des Bundeshaushalts allerdings davon auszugehen, dass es zu einer teilweisen Verdrängung anderer geplanter Ausgaben kommen wird. Viele der Klimaschutzinvestitionen sind einerseits Ersatzinvestitionen gleichzeitig aber auch mit höherer Effizienz verbunden. Gerade bei Elektroautos oder Wärmepumpen bleibt dies in der Wahrnehmung oft unberücksichtigt.

In der Energieerzeugung konzentrieren sich die Mehrinvestitionen im Klimaschutzszenario auf PV- und Windenergieanlagen sowie die Wasserstoffherzeugung. Für die Stromerzeugung gibt es sinkende Einspeisevergütungen, wobei zunehmend bei Wind offshore und PV auch Anlagen ohne Einspeisevergütung ans Netz gehen. Bei Wind offshore werden Rechte für das Betreiben erster Windparks bereits versteigert. Die Anlagen sind einzelwirtschaftlich lohnend und damit über den Strompreis finanziert. Die Investitionen dürften weitgehend zusätzlich erfolgen. Beim Wasserstoffhochlauf ist zumindest in der Anfangsphase ein größerer Teil staatlich gefördert. Die Infrastruktur ist überwiegend umlagefinanziert, was grundsätzlich für Zusätzlichkeit spricht. Allerdings besteht im Bereich der Stromerzeugung das Problem, dass bereits heute Teile der Netzentgelte staatlich finanziert sind, was angesichts der Schuldenbremse Ausgaben an anderer Stelle verhindert. Außerdem sind die Betreiber der Verteilnetze teilweise in staatlicher Hand, was die Zusätzlichkeit ebenfalls begrenzen könnte.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Die Folgen der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen

Die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, die nur zusätzlich auftretende und gut quantifizierbare Wirkungen enthalten, werden in Form von Verlusten des Bruttoinlandsprodukts, seiner Komponenten und in der Beschäftigung ermittelt, indem

Szenario 2 (Scen2 EW) mit der Referenz verglichen wird. Bei den Schadenshöhen und Verlusten ist zu beachten, dass es sich einerseits nur um Schäden handelt, die nach 2024 klimawandelbedingt zu bereits bestehenden Effekten von Extremwetterereignissen aus der Vergangenheit hinzukommen und die Schäden andererseits eine konservative Untergrenze darstellen, da nur monetär bewertbare Klimafolgen berücksichtigt werden können. Es handelt sich um eine Szenariorechnung, die durch die getroffenen Annahmen gekennzeichnet und begrenzt ist, und nicht um eine Projektion oder gar Prognose zukünftig wahrscheinlicher Effekte.

Abbildung 34: Relative Veränderung im BIP und seinen Komponenten durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen für ausgewählte Jahre



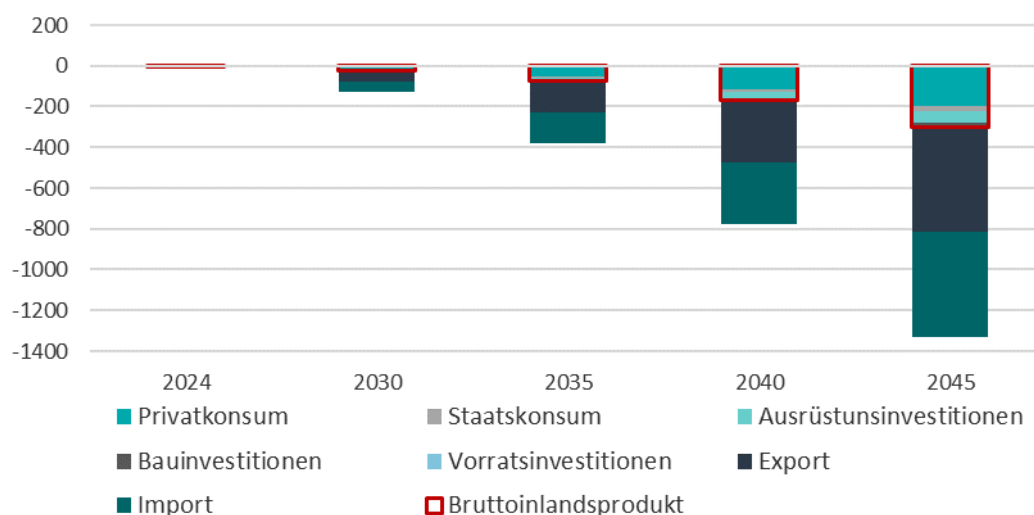
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der sich fortsetzende Klimawandel in Form von Extremwetterereignissen eindeutig mindernd auf die Wirtschaftsleistung wirkt und die Schäden mit Voranschreiten des Klimawandels immer größer werden. 2035 liegt das preisbereinigte BIP um 0,4% niedriger als in der Referenz, 2045 um 0,8% (vgl. Abbildung 34). Insgesamt reduziert sich das preisbereinigte BIP kumuliert bis 2045 um 300 Mrd. Euro im Vergleich zu einer Entwicklung ohne zusätzliche Extremwetterereignisse (rote Umrandung in Abbildung 35). Zur Einordnung: Die Kosten der Überflutungskatastrophe an Ahr und Erft werden auf ca. 40,5 Mrd. Euro geschätzt (Trenczek et al. 2022a). Dies würde also bedeuten, dass mit Kosten in Höhe dieses kostenträchtigen Einzelereignisses ca. alle drei Jahre gerechnet werden muss. Die weiteren Dimensionen des Vergleichsbeispiels verdeutlichen auch die Kosten und negativen Folgen, die hier nicht oder nur schwer monetär erfasst werden können, wie der Verlust an Lebensqualität, psychische Langzeitwirkungen, Traumata, der Verlust an Artenvielfalt und Andere. Diese nicht-monetären Kosten sind bei dieser Abschätzung nicht eingepreist. Die tatsächlichen Wirkungen auf die Wirtschaft dürften also deutlich negativer ausfallen und werden insbesondere nach 2045 auch für Deutschland noch massiv an Bedeutung gewinnen. So zeigen Klimamodelle, u.a. für das IPCC (IPCC 2023a), dass die Erderwärmung und mit ihr die Risiken und

Wirkungen des Klimawandels insbesondere nach 2045 abhängig von dem Grad der Klimaschutzbemühungen an Intensität und Schwere zunehmen werden. Das mögliche Überschreiten von Klimakipppunkten könnten die Kosten von Extremwetterereignissen für Deutschland nochmals erheblich höher ausfallen lassen.

Die Betrachtung des BIPs allein verstellt zudem den Blick darauf, dass die Wirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen auf die einzelnen Komponenten zum Teil wesentlich stärker ausfällt (vgl. gestapelte Balken in Abbildung 35). Insbesondere der internationale Handel weist hohe Abweichungen auf. So liegen sowohl Export als auch Import real um mehr als 500 Mrd. niedriger. Dies ist vor allem den Klimawandelfolgen geschuldet, die im Ausland entstehen und über die Handelsstrukturen ihre Wirkung über Preissteigerungen auch im Inland entfalten. Neben dem Handel ist auch der private Konsum negativ betroffen: Die privaten Haushalte konsumieren aufgrund der Klimawandelfolgen preisbereinigt um 200 Mrd. Euro weniger. Dies ist zum einen erhöhten Lebenshaltungskosten (v.a. bei Lebensmitteln und Mieten) und zum anderen einer höheren Sparneigung (Rückstellungen zur Schadensregulierung) geschuldet.

Abbildung 35: Durch quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen bedingte kumulierte Verluste im realen BIP (in Mrd. Euro)



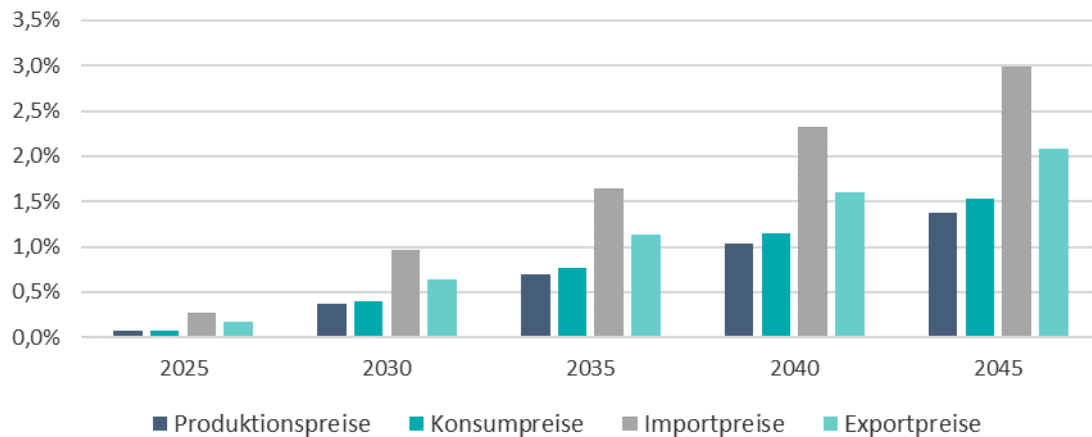
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Die erhöhten Rückstellungen und Abschreibungen auch bei Unternehmen für eine mögliche Schadensregulierung infolge des voranschreitenden Klimawandels schlagen sich zudem in einem Rückgang der Investitionen nieder.

Die preissteigernde Wirkung ist auch in Abbildung 36 zu erkennen. Die Importpreise liegen 2045 um 3% über der Referenz. Diese Entwicklung nimmt über importierte Vorleistungen direkt Einfluss auf die Produktionskosten und damit auf die Produktionspreise, die 2045 1,4% höher ausfallen als in einer Entwicklung ohne voranschreitenden Klimawandel. Die höheren Preise bei importierten und heimischen Produkten schlagen sich auch in einem stärkeren Anstieg der Konsumentenpreise nieder: Die Konsumpreise steigen 2045 um 1,5% stärker als in der Referenz. Die gestiegenen Produktionspreise werden auch auf Güter für den Export aufgeschlagen. Die Exportpreise liegen dadurch 2045

um 2,1% höher. Die steigenden Exportpreise äußern sich schließlich in den oben beobachteten Rückgängen im Export. Insgesamt steigt die Inflation jährlich um durchschnittlich 0,1 Prozentpunkte stärker als in der Referenz.

Abbildung 36: Wirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen auf unterschiedliche Preise (in %)

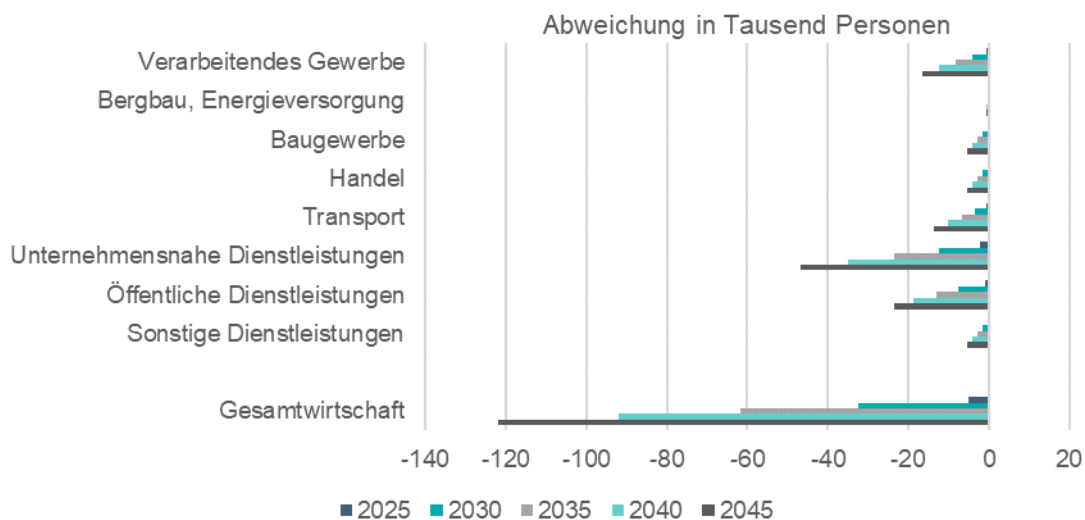


Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Den Zusammenhang zwischen Klimawandel und höheren Preisen finden auch Kotz et al. (2024a), nach denen ein Anstieg der monatlichen Durchschnittstemperatur zu einer höheren Gesamtinflation führt. Dieser Zusammenhang ist nicht-linear und langanhaltend und kann bis 2035 abhängig vom gewählten Emissionsszenario zu einem Anstieg in der Gesamtinflation von 0,8 bis 0,9 Prozentpunkten pro Jahr führen (Kotz et al. 2024a).

Gesamtwirtschaftlich vermindert sich der Output über alle Branchen im Jahr 2045 um 1,2%. Mit der verringerten Produktion reduziert sich auch der Bedarf an Arbeitskräften. Gesamtwirtschaftlich werden 2045 ca. 120 Tsd. Beschäftigte weniger eingesetzt als in der Referenz (vgl. Abbildung 37). Am stärksten geht die Zahl der Beschäftigten gegenüber der Referenz bei den Unternehmensnahen Dienstleistungen und den Öffentlichen Dienstleistungen zurück. Ihre Anzahl verringert sich 2045 um fast 50 Tsd. bzw. gut 20 Tsd. Personen. Bei den unternehmensnahen Dienstleistungen liegt dies insbesondere daran, dass diese Branchen in der Vorleistungsstruktur nachgelagert sind und Dienstleistungen anbieten, die von vielen vorgelagerten Branchen grundsätzlich eingesetzt werden (müssen). Dazu gehört z.B. das Gastgewerbe, die Steuerberatung, Vermietung und Andere. Reduziert sich Nachfrage und damit die Produktion in den vorgelagerten Branchen, verringert sich dadurch auch der Bedarf an wirtschaftsnahen Dienstleistungen. Die Nachfrageänderungen, die produktionsbedingt auftreten, summieren sich durch die Kombination von indirekten und induzierten Effekten auf und resultieren im vergleichsweise hohen Rückgang des Arbeitskräfteeinsatzes.

Abbildung 37: Durch quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen bedingte Veränderungen bei der Beschäftigung nach Branchen für ausgewählte Jahre (in 1000)



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Die Höhe der hier abgeschätzten Kosten der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen sind vergleichbar mit Ergebnissen ähnlicher makroökonomischer Modelle, welche sich auf Deutschland fokussieren und die Wirtschaftsstruktur detailliert im gesamtwirtschaftlichen Zusammenhang abbilden. In Tabelle 17 werden die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung (1. Zeile) anderen Studienergebnissen gegenübergestellt, wobei zur besseren Vergleichbarkeit die durchschnittlichen Schadenskosten pro Jahr ausgewiesen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Effekte der Extremwetter zu Beginn des Betrachtungszeitraums eigentlich geringer ausfallen und insbesondere nach 2045 deutlich zunehmen. Bereits heute bestehende Klimawandelfolgen und denkbare drastische Klimawandelfolgen z.B. bei Erreichen von Kipppunkten sind darin nicht enthalten.

Tabelle 17: Studienergebnisse zu quantifizierbaren Effekten von Extremwetterereignissen (Verluste im BIP)

Modell	Betrachtungszeitraum	Schadenskosten (Verluste im BIP)	Schadenskosten p.a.
PANTA RHEI (aktuelle Ergebnisse),	2025 – 2045	2045: -0,8% bis 2045: -300 Mrd.	14,3 Mrd. €
PANTA RHEI (Flaute et al. 2022)	2022 – 2050	bis 2050: -280, -530, -910 Mrd. €	9,7/ 18,2/ 31,4 Mrd. €
D.CLIMATE (Philip et al. 2021)	2020 – 2070	2070: -1,2%, bis 2070: -730 Mrd. €	14,3 Mrd. €
WIAGEM (Kemfert 2007)	2026 – 2050	bis 2050: -410 Mrd. €	17 Mrd. €

Quelle: Eigene Auswertung.

Klimaökonometrische Studien finden demgegenüber deutlich höhere Klimawandelkosten bereits für einzelne Wirkungskanäle oder auch auf Basis der bereits bis jetzt emittierte Emissionen. Kotz et al. (2024b) ermitteln etwa Kosten in Form einer Reduktion des globalen Durchschnittseinkommens um 19% und des europäischen Durchschnittseinkommens um 11% bis 2050. Burke et al. (2015) rechnen mit einer Reduktion des globalen Durchschnittseinkommens um 23% bis 2100 unter der Annahme gleichbleibender Anpassungseffekte.²⁴

Die Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen ökonometrischen Studien wie etwa zur jüngsten Veröffentlichung von Kotz et al. (2024b), in welcher ein fixed-effects Panel Regression Ansatz zur Ermittlung von ökonomischen Response Funktionen in Kombination mit eine Klimaentwicklung aus 21 Klimamodellen angewendet wird und die hohe negative Effekte ausweist, ist u.a. schon wegen der methodischen Herangehensweise nur sehr eingeschränkt möglich. Die Autor:innen bewerten zudem die Kosten des Klimawandels gegenüber einem kontrafaktischen Szenario, in dem kein Klimawandel vorliegt. In der vorliegenden Studie werden jedoch die Kosten ausgewiesen, die der weiter voranschreitende Klimawandel mit sich bringt, die also zusätzlich zu den in der Vergangenheit beobachteten Schäden noch hinzukommen werden. Des Weiteren können durch das Regressionsmodell keine stabilisierenden Zusammenhänge des Wirtschaftskreislaufs wie in makroökonomischen Modellen berücksichtigt werden. Eine zentrale Erkenntnis aus Kotz et al. (2024b) ist, dass die Klimawandeleffekte bis 2049 durch vergangene Emissionen bereits unabänderlich vorgegeben sind, die Schäden also in jedem Fall auftreten werden. Durch diesen zeitlichen Versatz ist eine Eindämmung der Erderwärmung zur Verhinderung schlimmerer Entwicklungen nach 2050 damit nur mit stringenten Investitionen in den Klimaschutz möglich. Klimaanpassungsmaßnahmen unterstützen dabei, die in jeden Fall auftretenden Klimawandeleffekte und die damit verbundenen Schäden bis 2050 zu verringern. Daher sollten beide Maßnahmen zur Eindämmung der

²⁴ S. dazu auch die Diskussion in der Infobox zur Quantifizierung von Klimawandelkosten auf Seite 7.

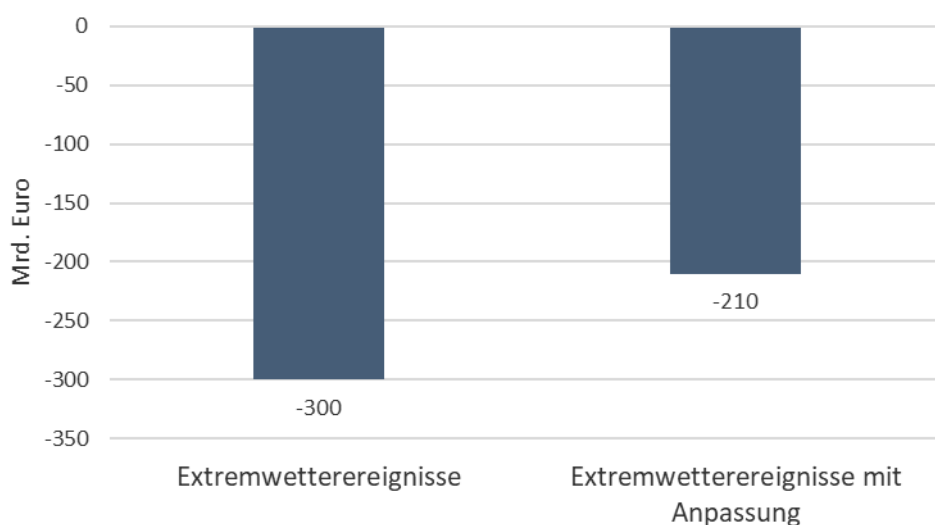
Klimawandelfolgen komplementär verfolgt werden. Die Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen auf die Klimakosten wird im folgenden Abschnitt 4.3.2 abgeschätzt, die Effekte der Klimaschutzinvestitionen in Abschnitt 4.3.4.

4.3.2 Die Wirkung der vereinfacht abgeschätzten Ausgaben für Anpassung an Extremwetterereignisse

Die Wirkung der Anpassung in Form von Verlusten im BIP, seiner Komponenten und in Veränderungen der Produktion und der Beschäftigung werden ermittelt, indem Szenario 3 (Scen3_EWA) und Szenario 2 (Scen2_EW) jeweils mit der Referenz (Szenario 1) verglichen werden. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich hinsichtlich der ausgewiesenen Klimawandelfolgen um konservative Untergrenzen handelt, da nur ein Teil der Klimawandelfolgen im Rahmen dieses Gutachtens von uns bewertet werden konnte. Zu den Annahmen hinsichtlich Klimaanpassung auf Basis einer vereinfachten Abschätzung siehe Kapitel 4.2.3.

Abbildung 38 zeigt die kumulierten Abweichungen im realen BIP für die Jahre 2024-2045 für das Extremwetter-Szenario (Scen2_EW) im Vergleich zu Referenz sowie für das Anpassungs-Szenario (Extremwetter und Anpassung, Scen3_EWA) im Vergleich zu Referenz (Szenario 1). Die Ergebnisse zeigen eine positive Wirkung von Klimaanpassung auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung verglichen mit dem Extremwetterszenario ohne Anpassung. Insgesamt reduziert sich das preisbereinigte BIP im Anpassungsszenario kumuliert bis 2045 um 210 Mrd. Euro im Vergleich zur Referenz, während sich das preisbereinigte BIP im Extremwetterszenario über den Zeitraum bis 2045 kumuliert um 300 Mrd. Euro reduziert. Hierbei ist zu beachten, dass es sich explizit nicht um eine Prognose der vollumfänglichen Klimawandelkosten und ihrer Reduktion durch Klimawandelanpassung, sondern lediglich um eine Darstellung der abbildbaren Teilaspekte handelt.

Abbildung 38: Kumulierte Abweichung im realen Bruttoinlandsprodukt 2024-2045 (in Mrd. Euro, auf 10 gerundet)



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Tabelle 18 enthält die Auswirkungen des Anpassungsszenarios (Scen3_EWA) auf die einzelnen Komponenten des BIPs, gemessen in kumulierten Abweichungen in Mrd. Euro im Vergleich zur Referenz, Abbildung 39 die relativen Abweichungen in Prozent. Insbesondere der Handel weist hohe Abweichungen auf, sowohl Exporte als auch Importe liegen bis 2045 jeweils um 500 Mrd. Euro bzw. etwas mehr als 2 % niedriger. Dies ist auf die hier untersuchten quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen zurückzuführen, die durch den internationalen Handel entstehen. Diese Abweichungen entsprechen denen des Extremwetterszenarios ohne Anpassung (Scen2_EW), da die modellierten Anpassungsmaßnahmen nur „lokale“ Extremwetterereignisfolgen abmildern.

Der private Konsum weist im Anpassungsszenario weniger starke Abweichungen auf als im Extremwetterszenario. Die privaten Haushalte konsumieren preisbereinigt 150 Mrd. Euro weniger, während sie im Extremwetterszenario preisbereinigt 200 Mrd. Euro weniger konsumieren – jeweils verglichen zur Referenz. Die Lebenshaltungskosten steigen durch die Anpassungsmaßnahmen etwas weniger stark an, auch die Sparneigung steigt weniger stark. Durch die Investitionen in Klimaanpassung, steigen die Bauinvestitionen im Anpassungsszenario gegenüber der Referenz um 10 Mrd. Euro bzw. rund 0,25 % an.

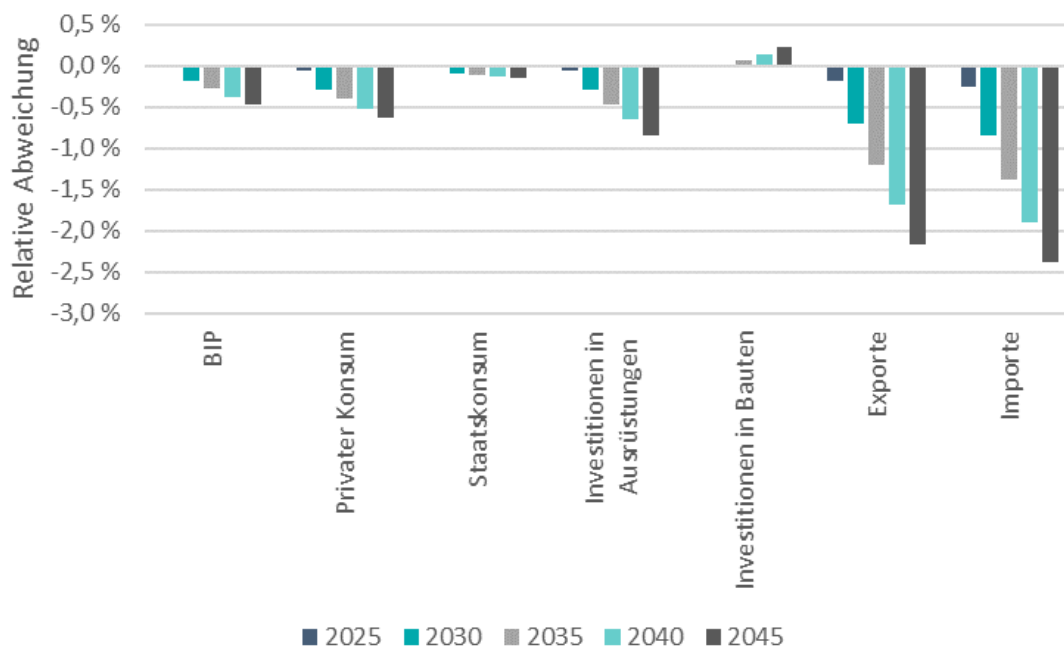
Tabelle 18: Folgen der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen mit vereinfacht abgeschätzten zukünftigen Anpassungsmaßnahmen gemessen in kumulierten Abweichungen im BIP und seinen Komponenten in Mrd. Euro (auf 10 gerundet)

	2025	2030	2035	2040	2045
Bruttoinlandsprodukt	0	-20	-70	-130	-210
Privater Konsum	0	-20	-50	-100	-150
Staatskonsum	0	0	-10	-10	-20
Ausrüstungsinvestitionen	0	0	-10	-30	-50
Bauinvestitionen	0	0	0	0	10
Vorratsinvestitionen	0	0	0	0	0
Export	0	-50	-140	-300	-500
Import	-10	-50	-150	-300	-500

Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

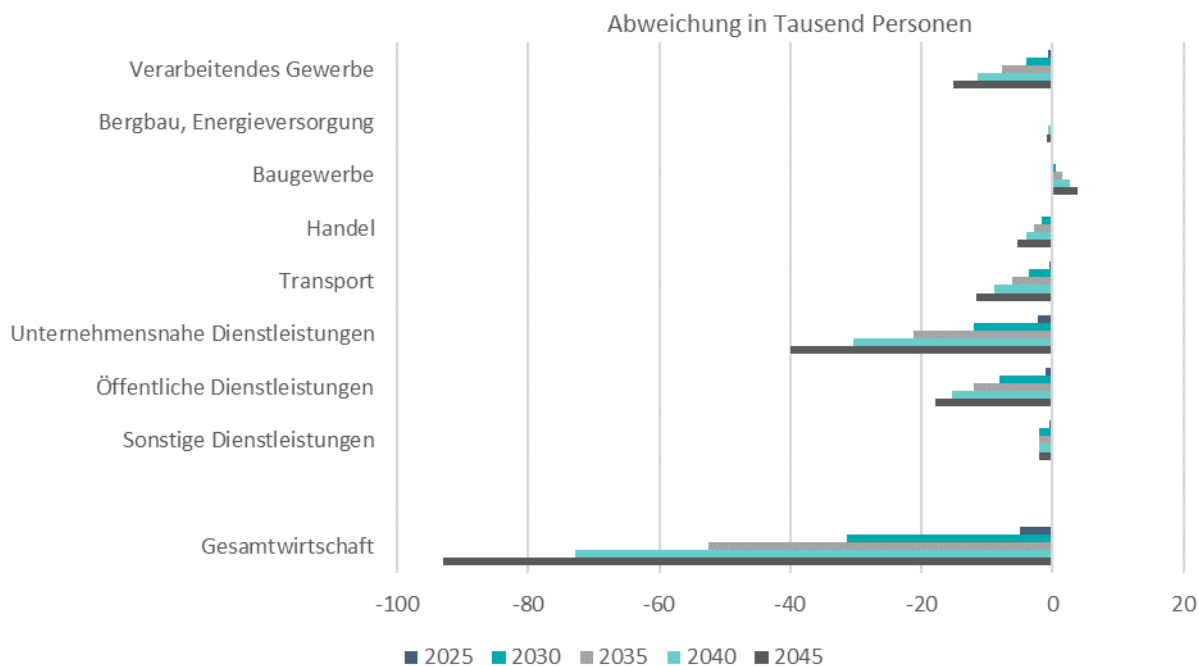
Gesamtwirtschaftlich vermindert sich die Produktion, die sich auch in einem geringeren Bedarf an Arbeitskräften zeigt (vgl. Abbildung 40). Insgesamt werden im Jahr 2045 etwa 90 Tsd. Beschäftigte weniger eingesetzt. Verglichen mit dem Klimawandelszenario ist der Rückgang in der Beschäftigung weniger stark, im Baugewerbe werden geringfügig mehr Beschäftigte eingesetzt als in der Referenz.

Abbildung 39: Relative Veränderung im BIP und seinen Komponenten durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen mit vereinfacht abgeschätzter Anpassung für ausgewählte Jahre



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Abbildung 40: Veränderungen bei der Beschäftigung durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzte Anpassungsmaßnahmen nach Branchen für ausgewählte Jahre (in 1000)



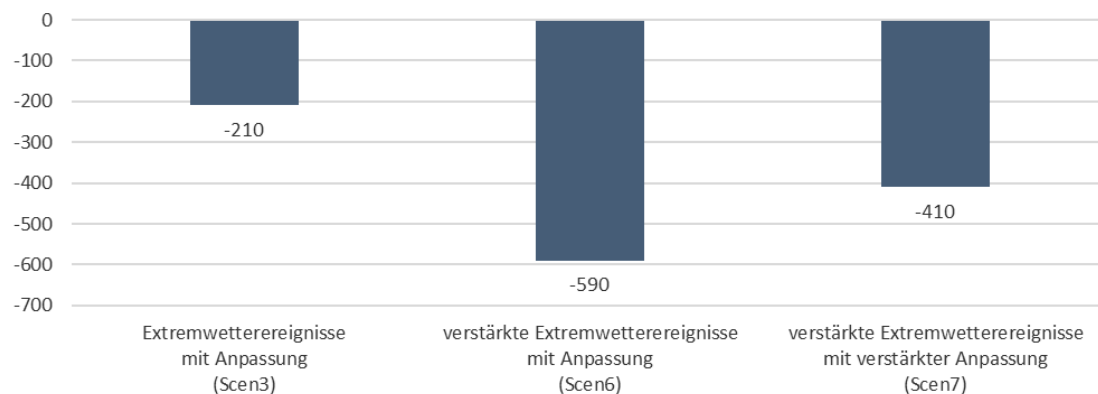
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

4.3.3 Sensitivitäten Extremwetter und Anpassung

Im Folgenden werden Sensitivitäten zu Extremwetterereignissen und Anpassung gerechnet. Die Sensitivitätsrechnung Extremwetter (Scen6) zeigt auf, welche Konsequenzen verstärkte Extremwetterereignisse unter den gegebenen Klimaanpassungsmaßnahmen aus Szenario 3 (Scen3) haben. Um die Folgen der zusätzlichen quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen auf das BIP und seine Komponenten darzustellen wird Scen6 mit Scen3 verglichen. Wie in Abbildung 41 zu sehen, reduzieren verstärkte Extremwetterereignisse trotz bestehender Klimawandelanpassungen das BIP bis 2045 kumuliert um 590 Mrd. Euro, es fallen also zusätzliche Schäden in Höhe von 380 Mrd. Euro an.

Wird nun vorausschauend in Erwartung verstärkter Extremwetterereignisse mit vermehrten Klimaanpassungsmaßnahmen reagiert, können ein Teil der neu entstandenen Kosten wieder aufgefangen werden. Dazu wird die Sensitivitätsrechnung verstärkte Anpassung (Scen7) mit Scen6 verglichen. Das BIP reduziert sich kumuliert bis 2045 um 410 Mrd. Euro, die kumulierte Wirkung einer verstärkten Klimaanpassung bei verstärkten Extremwetterereignissen liegt somit bei 180 Mrd. Euro. Im Vergleich zu den ursprünglich regulär angenommenen quantifizierbaren Effekten von Extremwetterereignissen mit Anpassung liegen die Restschäden mit 410 Mrd. Euro gegenüber 210 Mrd. Euro aber noch um 200 Mrd. Euro höher.

Abbildung 41: Kumulierte Wirkung durch quantifizierbare Effekte von verstärkten Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzter Anpassung auf die preisbereinigte Wirtschaftsleistung



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Mit Blick auf die relativen Wirkungen der Sensitivitäten verstärkte Extremwetter und verstärkte Anpassung auf das reale BIP und seine Komponenten zeigen sich insbesondere hohe Abweichungen bei den Ex- und Importen, die im Zeitverlauf immer stärker ausfallen (Abbildung 42).

Abbildung 42: Relative Wirkung auf das preisbereinigte BIP und seine Komponenten durch quantifizierbare Effekte von verstärkten Extremwetterereignissen mit vereinfacht abgeschätzten regulären (Scen6) und verstärkten Anpassungsmaßnahmen (Scen7), in %



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Im Jahr 2045 liegen diese um ca. 2% niedriger als in Scen3, welches bereits Klimaanpassungsmaßnahmen enthält. Dies ist insbesondere auf die Folgen von Extremwettern zurückzuführen, die durch den internationalen Handel entstehen. Die Wirkungen im verstärkten Anpassungsszenario entsprechen in etwa den Wirkungen des verstärkten Extremwetterszenarios, da mit den modellierten Anpassungsmaßnahmen nur die „lokalen“ Folgen abgemildert werden können. Ansonsten sind durch die verstärkte Anpassung die Effekte auf das reale BIP, den privaten Konsum und die Investitionen weniger stark negativ als im verstärkten Extremwetterszenario mit regulären Anpassungsmaßnahmen. Insbesondere bei den Bauinvestitionen ergeben sich bei der verstärkten Anpassung an Extremwetterereignisse leicht positive Effekte. Zudem liegt der Staatskonsum in etwa auf Höhe des kombinierten Szenarios.

4.3.4 Die Wirkung der Klimaschutzmaßnahmen

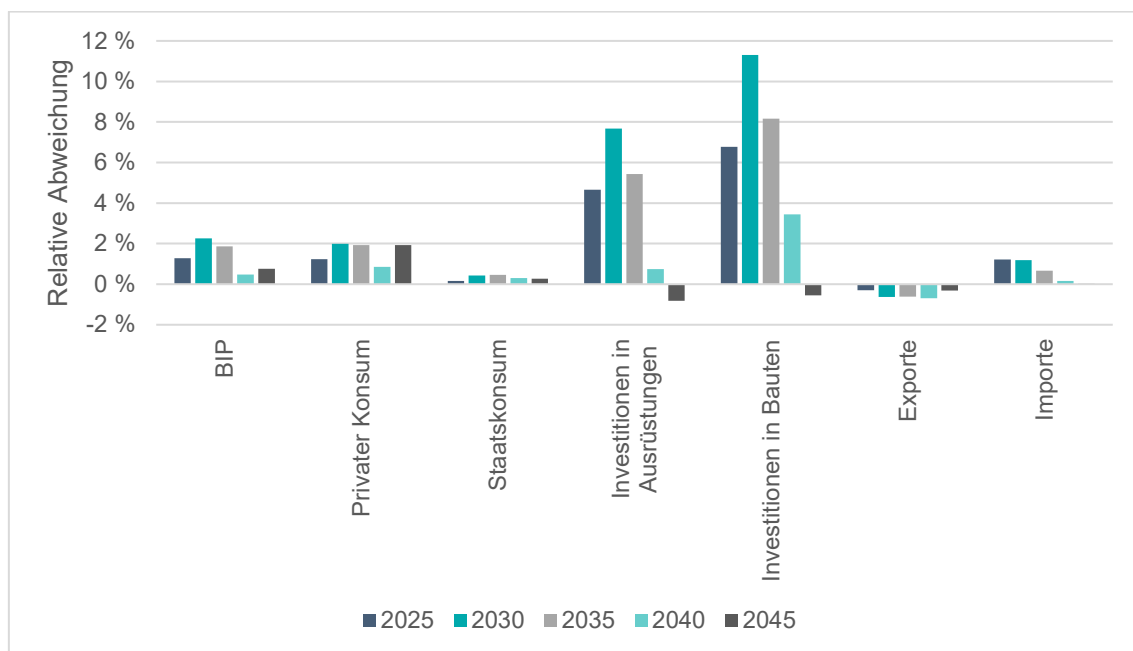
Der alleinige Effekt des Klimaschutzes wird als Differenz zwischen dem Klimaschutzszenario (Szen4_KS) zur Referenz ermittelt. Abbildung 43 stellt hierfür die Abweichungen des BIP und seiner verwendungsseitigen Komponenten bis 2045 dar. Gemessen an der relativen Differenz zum Referenzszenario liegen insbesondere die Investitionen in Ausrüstungen und Bauten aufgrund der Klimaschutzmaßnahmen bis 2040 höher. Bis 2045 sieht das Szenario schließlich vor, dass die Transformation hin zur Klimaneutralität mit Ausnahme der letzten Heizungsumstellungen weitgehend abgeschlossen sein wird; dadurch sind im Klimaschutzszenario im Jahr 2045 weniger Investitionen nötig als in der Referenzentwicklung.

Die Außenhandelsbilanz verschlechtert sich geringfügig: Das aufgrund der CO₂-Preis-pfade höhere Preisniveau im Klimaschutzszenario wirkt sich senkend auf die Exporte und erhöhend auf die Importe aus, während letztere außerdem durch die zusätzliche Nachfrage angehoben werden. Dieser Effekt ergibt sich im nationalen Modell PANTA RHEI vor allem durch die Annahme, dass sich im Rest der Welt keine Änderungen gegenüber der Referenz ergeben. Sollten dort vergleichbare Klimaschutzbemühungen stattfinden, sollte dieser negative Wettbewerbseffekt wegfallen. Andererseits könnten

sich durch weltweiten Klimaschutz auch negative gesamtwirtschaftliche Effekte z.B. in Ländern mit hohen Energieexporten ergeben, oder die Kosten des internationalen Handels könnten steigen, wenn THG-Emissionen von Schifffahrt und Luftfahrt bepreist werden, was die deutschen Exporte dämpfen könnte.

Insgesamt resultiert unter Annahme der Zusätzlichkeit aller Investitionen ein positiver Effekt auf das BIP, der im Jahr 2030 bei 2,3 % und 2045 bei 0,8 % gegenüber dem Referenzszenario liegt. Infolge dieser höheren Wirtschaftsleistung liegen die verfügbaren Einkommen der privaten Haushalte und damit ihr Konsum höher. Im privaten Konsum sind auch die Ausgaben der privaten Haushalte für Heizungen enthalten, die gegen Ende des Projektionszeitraums im Klimaschutzszenario zunehmen im Gegensatz zum Referenzszenario (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4). Hier kommt es zu vorzeitigen Außerbetriebnahmen von Gasheizungen, die in den Folgejahren zu zusätzlichen Abschreibungen in der Wohnungswirtschaft führen könnten, hier aber durch reduzierte Ersparnis abgebildet werden. Nach 2045 ist dieser Heizungstausch beendet, sodass in den Folgejahren privater Konsum und BIP relativ zur Referenz weniger positiv ausfallen dürften als noch im Jahr 2045.

Abbildung 43: Relative Abweichung des BIP (preisbereinigt) und seiner Komponenten im Klimaschutzszenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz)



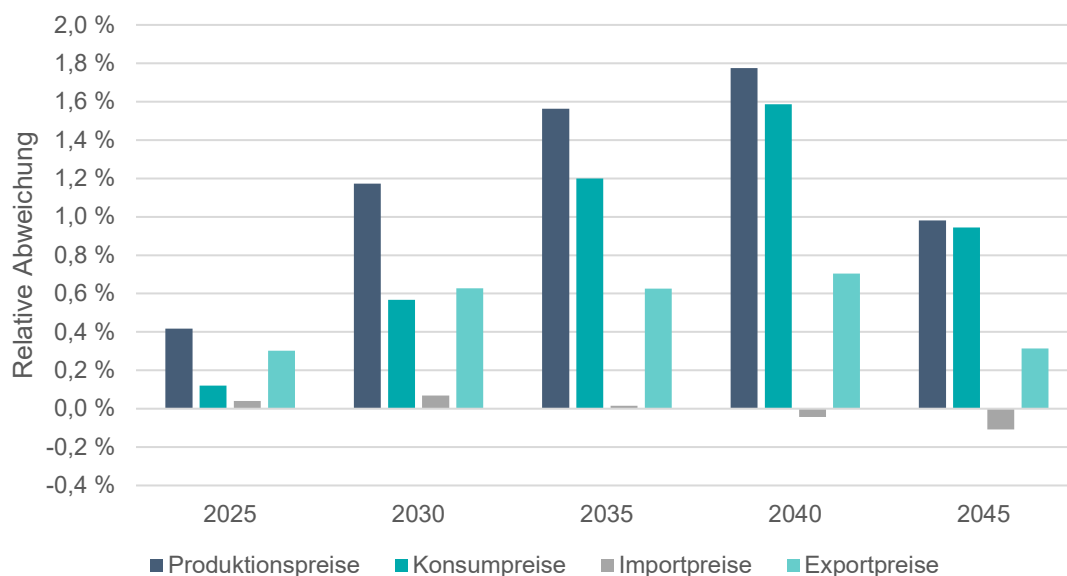
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Das Klimaschutzszenario führt in der gewählten Ausgestaltung aufgrund der höheren Wirtschaftsleistung zu einem verbesserten Finanzierungssaldo des Staates, der in den Jahren 2025 bis 2035 um 25 bis 35 Mrd. Euro jährlich besser ausfällt als in der Referenz. In den Folgejahren ist die Differenz nur noch leicht positiv. Allerdings sind derzeitige Fördermaßnahmen für Heizungen, die Energiewirtschaft oder die Industrie im Klimaschutzszenario nicht explizit erfasst, sodass aus den Ergebnissen nicht geschlossen werden kann, dass Klimaschutz dem Staat zusätzliche finanzielle Spielräume erschließt. Zugleich liegt der Finanzierungssaldo der privaten Haushalte durchgehend niedriger und

der Saldo für die nichtfinanziellen Kapitalgesellschaften, d.h. die Unternehmen ohne Banken und Versicherungen, bis 2035 niedriger und danach leicht höher als in der Referenz. Private Haushalte und Unternehmen reduzieren demnach ihre jährliche Ersparnis, um die Klimaschutzinvestitionen zu finanzieren.

Die vermehrten Klimaschutzinvestitionen, die höheren CO₂-Preise und die insgesamt höhere wirtschaftliche Aktivität führen auch über höhere Löhne zu insgesamt höheren Preisen im Klimaschutzscenario (Abbildung 44). Der Anstieg im Vergleich zur Referenz ist bei den Produktionspreisen und im weiteren Verlauf auch den Konsumentenpreisen deutlicher als bei den Export- und den Importpreisen, weil sich dabei die höheren CO₂-Preise, die höheren Strompreise, aber auch höhere Löhne stärker niederschlagen. Bei den Exportpreisen schlagen die Unternehmen entsprechend ihrem historisch beobachteten Verhalten nicht den kompletten Anstieg der Produktionspreise auf die Exportpreise auf. Der Anstieg bei den Importpreisindizes ergibt sich allein durch Strukturveränderungen. Die Importpreise in den einzelnen Wirtschaftsbereichen unterscheiden sich zwischen den Szenarien nicht.

Abbildung 44: Relative Abweichung verschiedener Preise im Klimaschutzscenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz

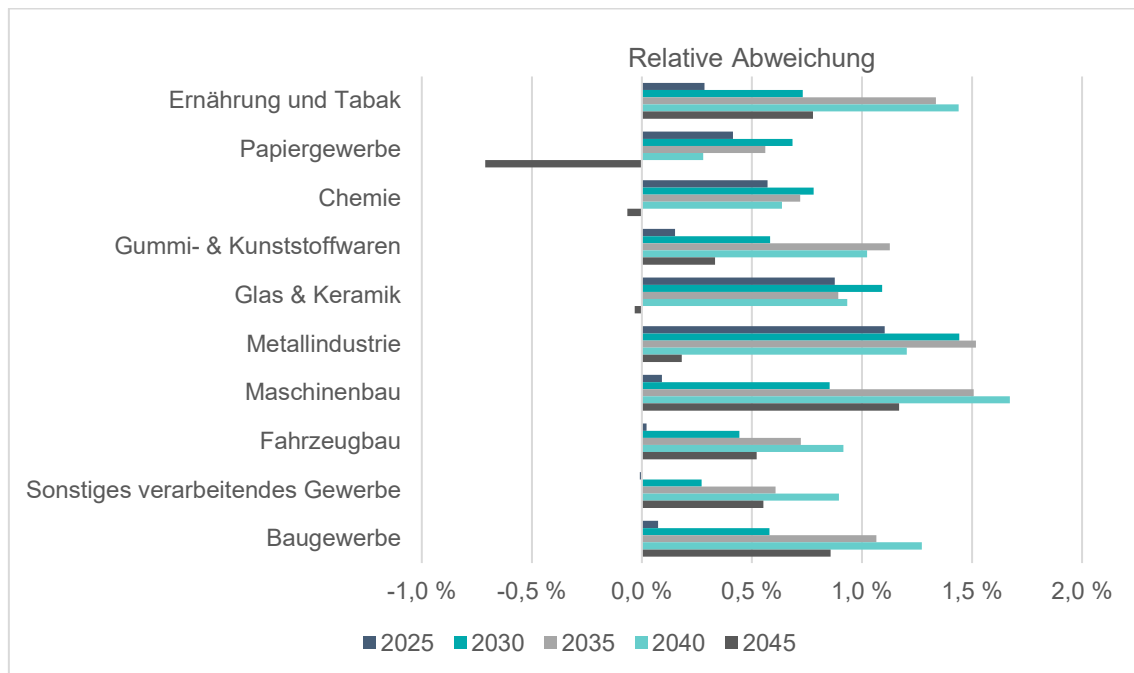


Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Verschiedentlich wird argumentiert, dass das Produzierende Gewerbe besonders stark von höheren CO₂-Preisen und höheren Strompreisen betroffen ist. Deshalb sind im Folgenden die Produktionspreise wichtiger Wirtschaftsbereiche der Industrie dargestellt. Da die Produktionspreise als Aufschlag auf die Stückkosten ermittelt werden, spiegeln sie den Kostenanstieg wider. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums steigen sie überdurchschnittlich in den energie- und CO₂-intensiven Bereichen Chemie, Glas und Keramik sowie der Metallindustrie an, was diesen Zusammenhang bestätigt (Abbildung 45). Danach ist das Bild weniger eindeutig. Zwar bleiben die Preiseffekte in der Metallindustrie überdurchschnittlich, aber auch in Bereichen mit niedrigen CO₂-Emissionen wie dem Maschinenbau steigen die Preise deutlich. Das lässt sich auch damit erklären, dass die THG-

Emissionen im Zeitverlauf auch gegenüber der Referenz deutlich zurückgehen und umgekehrt die CO₂-Preise auch in der Referenz zunehmen, wenn auch etwas weniger stark als im Klimaschutzscenario. Die CO₂-Kosten nehmen also im Zeitverlauf im Vergleich zur Referenz eher ab. Schließlich kommt es durch höhere Investitionen und damit verbundene Abschreibungen, die höhere Beschäftigung und damit verbundene Lohnsteigerungen und generelle Preiseffekte durch das höhere BIP auch zu höheren Preisen in der gesamten Volkswirtschaft.

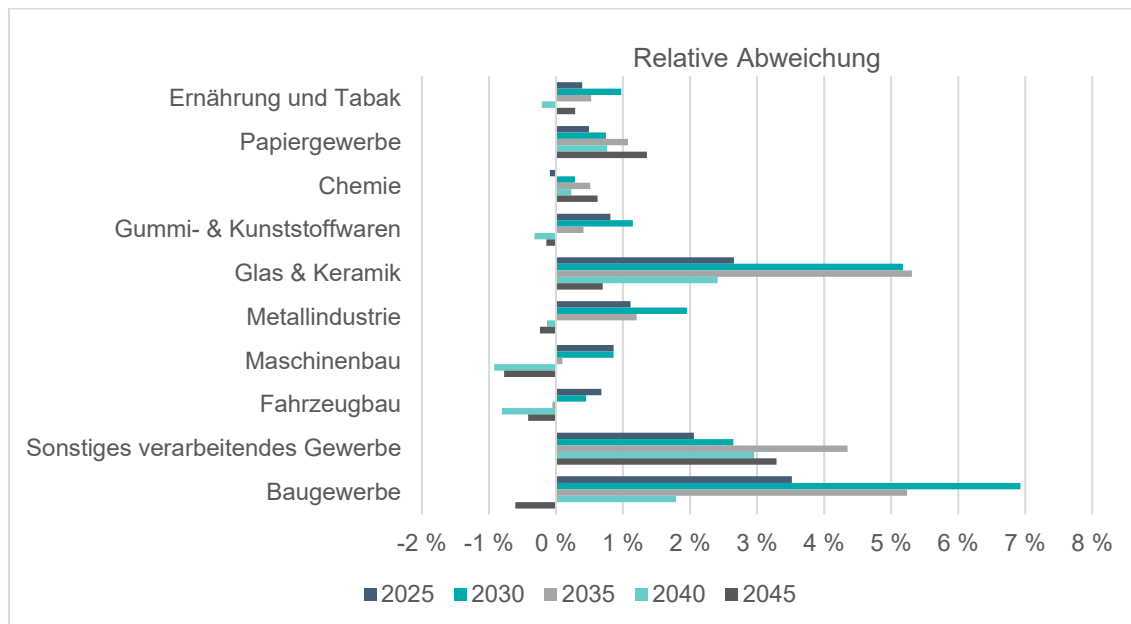
Abbildung 45: Relative Abweichung der Produktionspreise im produzierenden Gewerbe im Klimaschutzscenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Um die durch die höheren Investitionen generierte Nachfrage bedienen zu können, liegt die reale Produktion im Klimaschutzscenario in der Regel höher, wobei ab 2040 teilweise die Produktion auch niedriger liegt als in der Referenz (Abbildung 46).

Abbildung 46: Relative Abweichung der Produktion (preisbereinigt) im produzierenden Gewerbe im Klimaschutzscenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz

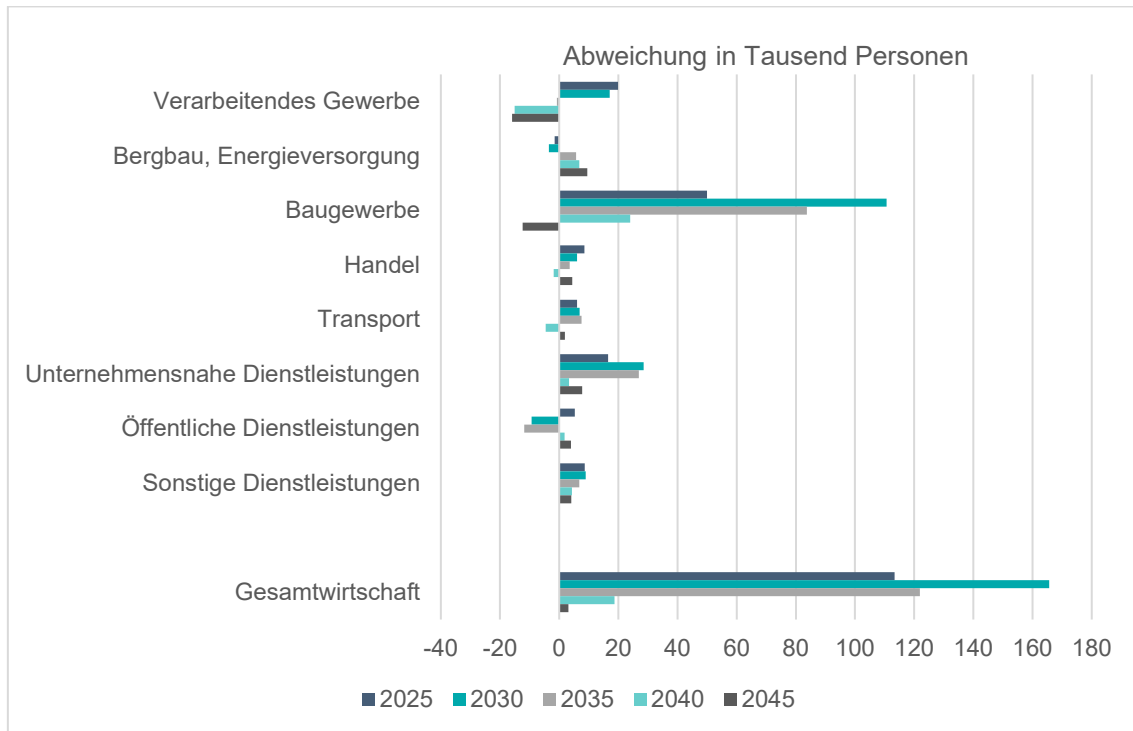


Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Am größten sind die positiven Produktionseffekte bei Glas und Keramik wegen der höheren Klimaschutzinvestitionen im Gebäudebereich sowie im Baugewerbe selbst. Eine geringfügig dämpfende Wirkung hat die schlechtere Außenhandelsbilanz: Die leicht niedrigere Nachfrage aus dem Ausland und die leicht höhere Importtätigkeit infolge der höheren inländischen Preise wirken sich negativ auf die inländische Produktion aus, was jedoch durch die positiven Produktionseffekte mehr als ausgeglichen wird. Lediglich in den Jahren 2040 und 2045 treten vereinzelt negative Produktionseffekte infolge der geringeren Investitionen im Klimaschutzscenario gegenüber dem Referenzscenario auf.

Die Auswirkungen des Klimaschutzscenarios auf die Beschäftigung sind gesamtwirtschaftlich positiv mit bis zu 166 000 zusätzlichen sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im Jahr 2030 (Abbildung 47). Im Zeitraum danach verringert sich der Effekt und geht zurück auf ein kleines Plus von 3 000 Beschäftigten im Jahr 2045 gegenüber der Referenzentwicklung. Vor allem das Baugewerbe und unternehmensnahe Dienstleistungen wie Architektur- und Ingenieurbüros, die Vorleistungen für die Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen erbringen, können ein höheres Beschäftigungsniveau verzeichnen. In einzelnen Wirtschaftsbereichen wie dem verarbeitenden Gewerbe und dem Baugewerbe treten in den späteren Jahren des Projektionszeitraums leicht negative Beschäftigungseffekte auf, welche sich hauptsächlich auf die niedrigere Investitionstätigkeit in den 2040er-Jahren zurückführen lassen.

Abbildung 47: Absolute Abweichung der Beschäftigung im Klimaschutzscenario (Scen4_KS) gegenüber der Referenz



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Es wird in PANTA RHEI nicht explizit modelliert, woher die zusätzlich Beschäftigten kommen bzw. wer die zusätzlich nachgefragten Arbeitsstunden leistet. Bei den höheren Reallohnen und etwas veränderter Produktionsstruktur im Klimaschutzscenario könnte das höhere Arbeitsangebot von im Referenzscenario Erwerbslosen, aus der Stillen Reserve und durch höhere Jahresarbeitszeiten bisher Beschäftigter erfolgen.

Die gesamtwirtschaftlich positiven Effekte des Klimaschutzes lassen sich in die Literatur einordnen (vgl. Abbildung 28, Tabelle 12, Tabelle 13). Nachfrageorientierte Modelle weisen positive Effekte des Klimaschutzes aus, insbesondere durch zusätzliche Klimaschutzinvestitionen (Abbildung 28). Auch andere Studien ermitteln demnach einen umgekehrt U-förmigen Verlauf der Effekte des Klimaschutzes. Die Ergebnisse liegen dabei am oberen Rand (vgl. Tabelle 12, Tabelle 13). Hierzu tragen verschiedene Punkte bei: Das unterstellte Roadmap-Szenario Energieeffizienz legt einen Schwerpunkt auf Energieeffizienzmaßnahmen. Langfristig liegt der Energieverbrauch deutlich niedriger als in der Referenz. Bei einem stärkeren Fokus des Klimaschutzscenarios auf Substitution durch erneuerbare Energieträger dürften die langfristigen Effekte des Klimaschutzes weniger positiv ausfallen.

Das Szenario ist darüber hinaus optimistisch in verschiedener Hinsicht: a) Die Klimaschutzmaßnahmen werden im Szenario von den Investoren umgesetzt. Die Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen ist im Szenario nicht durch konkrete Finanzierung hinterlegt, ohne dass die CO₂-Preise langfristig sehr stark steigen. Hier zeigt sich im Vergleich mit der historischen Entwicklung, dass der Umstieg auf Elektrofahrzeuge und Heizungen, die Gebäudesanierung, aber auch der Hochlauf der Windenergie, der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft oder die Kosten für das Laden von E-Autos sich bis Herbst 2024

weniger positiv entwickelt haben, als dies im Klimaschutzszenario unterstellt ist. Möglicherweise sind höhere Anreize durch staatliche Förderung, höhere CO₂-Preise oder mehr Eingriffe durch Ordnungsrecht nötig, um die Klimaschutzziele zu erreichen, als dies im Szenario unterstellt ist, was sich jeweils etwas negativ auf die Effekte des Klimaschutzes auswirken dürfte. Sicherlich sind auch die einzelwirtschaftlichen Vorteile von Klimaschutzmaßnahmen, sei es Wärmepumpe, Elektroauto oder Energieeffizienzverbesserung im Gebäudebereich oder in der Industrie noch besser zu kommunizieren.

Auf der anderen Seite sind angebotsseitige Restriktionen bei der Umsetzung denkbar, etwa durch Fachkräftemangel, der zusätzlichen Investitionen im Weg steht. Allerdings sind die Beschäftigungseffekte im Klimaschutzszenario begrenzt, was das Szenario in dieser Hinsicht als eher unkritisch erscheinen lässt.

b) Damit verbunden ist die Frage der konkreten Finanzierung etwa auch durch staatliche Förderung, die durch die staatliche Budgetrestriktion stärker begrenzt ist, als dies bei Erstellung des Roadmap-Szenarios zu erwarten war. Die Zusätzlichkeit von Investitionen ist fraglich, wenn Klimaschutz durch höhere Staatsausgaben angereizt werden muss und an anderer Stelle Staatsausgaben eingeschränkt werden müssten. Die insgesamt notwendigen Investitionen in die Dekarbonisierung Deutschlands sind hoch im Vergleich zu den gesamten Investitionen, was eine Herausforderung für Politik, aber auch Wirtschaft und private Haushalte ist.

c) In der Referenz angenommene Wachstumsraten des BIP in den Jahren 2023, 2024 und absehbar 2025 werden nicht erreicht, was die Finanzierung und reibungslose Umsetzung des Klimaschutzes auch erschwert. Offensichtlich steht die deutsche Wirtschaft etwa durch die Folgen des Ukrainekriegs vor Herausforderungen, die in der Referenz nicht enthalten sind und die auch den zeitlichen Pfad und die Finanzierung des Klimaschutzes im Vergleich zum Klimaschutzszenario beeinträchtigen.

d) Die Klimaschutzmaßnahmen finden im Szenario zeitlich so statt, dass keine zusätzlichen Abschreibungen bei vorzeitiger Stilllegung von Anlagen notwendig sind. Dies setzt voraus, dass der technische Fortschritt dem im Szenario angenommenen Profil folgt. In Verbindung mit den unter a) und b) aufgeführten Punkten ist die Annahme nicht notwendiger zusätzlicher Abschreibungen ebenfalls kritisch zu hinterfragen. So wurden in den letzten 2 Jahren viele Gasheizungen ersetzt, die vermutlich im Jahr 2045 technisch noch funktionsfähig sein werden. Das Szenario sieht hier vorzeitige Außerbetriebnahmen ab 2041 vor, die aber nicht als höhere Kosten modelliert worden sind. Beispielsweise in der deutschen Automobilindustrie findet die Transformation zur Elektromobilität langsamer statt als im Roadmap-Szenario unterstellt, während die chinesische Industrie sie beschleunigt hat. Anlagen der energieintensiven Industrie werden möglicherweise gar nicht mehr klimaneutral umgestellt, wenn sie nicht wirtschaftlich betrieben werden können.

e) Im Klimaschutzszenario wird angenommen, dass im Ausland vergleichbare Maßnahmen zum Klimaschutz getroffen werden wie in Deutschland und damit keine Kosten Nachteile verbunden sind oder Handelanteile gefährdet sind. Diese Annahme ist mit Blick auf die zentralen Wettbewerber auf den internationalen Märkten ebenfalls kritisch zu hinterfragen. China hat auch aus industriepolitischen Überlegungen heraus Klimaschutzmaßnahmen teilweise stärker beschleunigt als Deutschland. Die USA zielen mit der Inflation Reduction Act vor allem darauf, die Produktion u.a. von Klimaschutzgütern

im Inland zu stärken. Die Energiepreise liegen in beiden Ländern wie auch in anderen Teilen der Welt im Jahr 2024 niedriger als in Deutschland.

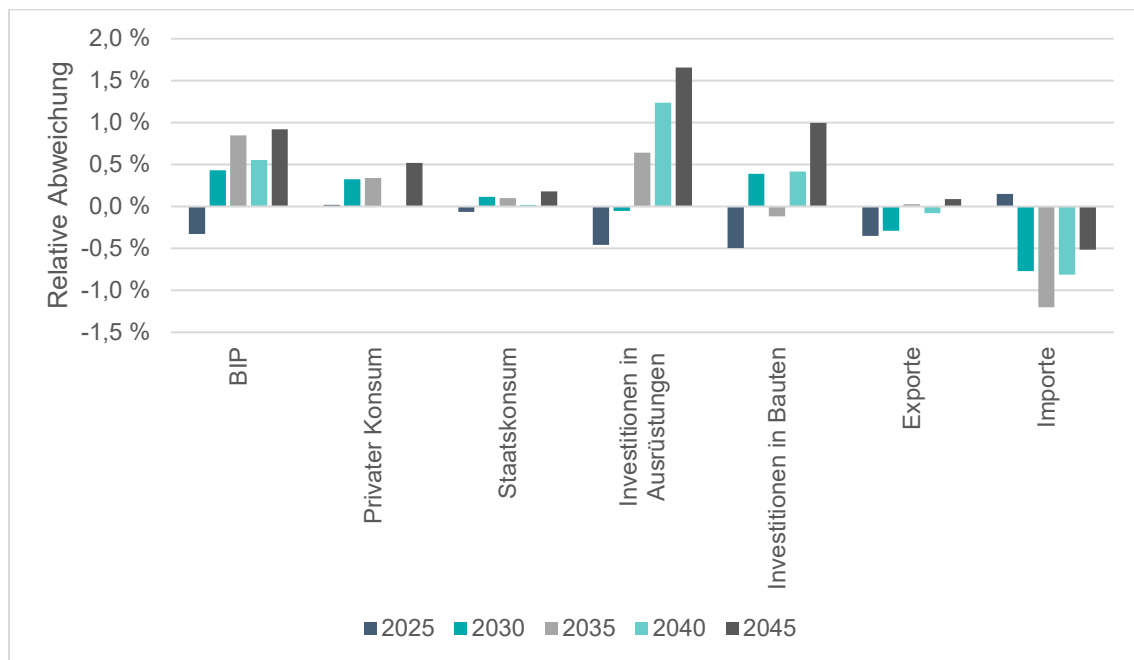
Sollten einzelne dieser Punkte weniger positiv ausfallen als im Klimaschutzszenario angenommen, würden auch die gesamtwirtschaftlichen Effekte eines alternativen Szenarioenvergleichs weniger positiv sein.

4.3.5 Sensitivität zum Klimaschutz mit Crowding-out

In der Sensitivitätsrechnung (Abbildung 48), in der die Klimaschutzinvestitionen nicht zusätzlich sind (Scen8), liegen die Investitionsimpulse annahmegemäß nahe Null, wobei Preiseffekte die Investitionen zusätzlich dämpfen und die höhere Wirtschaftsleistung modell-endogen nach 2030 zu etwas höheren Investitionen führen. Am deutlichsten sind die Wirkungen des angenommenen Crowding-out der Investitionen auf die Importe, weil Investitionsgüter vielfach hohe Importanteile aufweisen. Verminderte Importe fossiler Energieträger ergeben sich auch ohne zusätzliche Investitionen. Auch die Exporteffekte fallen besser aus als im Szenario mit vollständiger Zusätzlichkeit der Investitionen, weil die Preise weniger steigen. Die Außenhandelseffekte erhöhen das BIP. Der private Konsum und der Staatskonsum reagieren vor allem auf das höhere BIP, weil die Einnahmen der privaten Haushalte und des Staates jeweils ab 2030 höher ausfallen. Im Vergleich zum Scen4_KS mit zusätzlichen Investitionen nimmt der BIP-Effekt im Zeitverlauf zu. Ist er im Jahr 2025 zunächst leicht negativ, liegt er im Jahr 2030 grob bei einem Drittel und 2035 bei der Hälfte des Effekts bei unterstellter Zusätzlichkeit der Klimaschutzinvestitionen. In den Jahren 2040 und 2045, wenn auch im Klimaschutzszenario (Scen4_KS) die Investitionseffekte auslaufen, sind die BIP-Effekte ähnlich hoch. Es wird dabei in den letzten Jahren auch Crowding-in angenommen, d.h. dass die Investitionen in Ausrüstungen oder Bauten erhöht werden, wenn sie im Klimaschutzszenario niedriger ausfallen als in der Referenz. Die Annahme der Zusätzlichkeit der Investitionen spielt also vor allem für die kurz- und mittelfristigen gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimaschutzes eine Rolle. Die spiegelbildliche Annahme des Crowding-in stützt die gesamtwirtschaftlichen Effekte am Ende des Betrachtungszeitraums.

Der zentrale Grund für die längerfristig positiven gesamtwirtschaftlichen Effekte in der Sensitivität liegt im Design des Klimaschutzszenarios, das in Abschnitt 2.1 ausführlich im Vergleich zur Referenz beschrieben ist. Es zeichnet sich durch eine deutliche Zunahme der Energieeffizienz (Abbildung 8 ggü. Abbildung 7), deutlich niedrigere THG-Emissionen (Abbildung 2) und damit verbunden längerfristig niedrigere CO₂-Kosten und eine Verschiebung der Energieerzeugung hin zu heimischen Quellen aus. Statt Mineralölprodukten und Gas wird verstärkt Strom und PtX eingesetzt (Abbildung 9), was die Energieimporte reduziert. Dadurch fallen auch die gesamten Energieausgaben zwischenzeitlich niedriger aus als in der Referenz (Abbildung 13). Die gesamtwirtschaftlich höhere Energieeffizienz führt dazu, dass die Güterpreise gegenüber der Referenz nur begrenzt zunehmen, was den Exportrückgang und zunehmende Importe außerhalb des Energiesektors begrenzt.

Abbildung 48: Relative Abweichung des BIP (preisbereinigt) und seiner Komponenten bei einem vollständigen Crowding-out (Scen8_CO) gegenüber der Referenz



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

In den Anfangsjahren zeigen sich in der Sensitivität aber auch zunächst negative Effekte von Klimaschutz, die über höhere CO₂- und Strompreise zu höheren Kosten vor allem im Verarbeitenden Gewerbe führen, was die Exporte dämpft und die Importe erhöht, sodass das BIP im Jahr 2025 0,3% niedriger liegt als in der Referenz. Ohne deutliche Zunahme der Energieeffizienz und bei verlangsamt Umstieg der Industrie auf klimaneutrale Produktion könnten sich auch in späteren Jahren negativere Wirkungen des Klimaschutzes bei der Annahme von vollständigem Crowding-out zeigen.

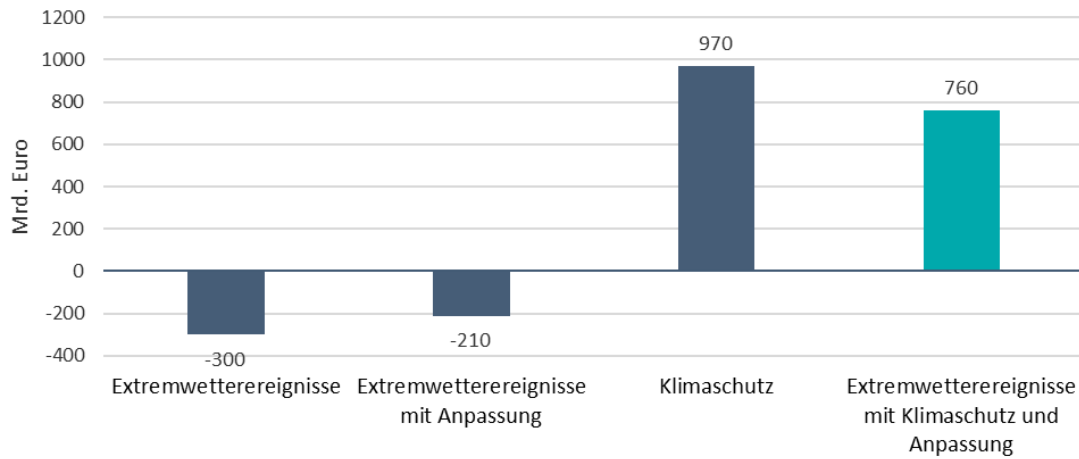
Das Klimaschutzszenario, das für die Roadmap Energieeffizienz entwickelt wurde, ist mit Blick auf die Steigerung der Energieeffizienz im Vergleich mit anderen Szenarien als eher optimistisch einzuschätzen. Auch andere oben aufgeführte Punkte sprechen dafür, dass das Szenario eher optimistisch ist. Bei Wahl eines anderen Klimaschutzszenarios könnten die gesamtwirtschaftlichen Effekte einer Sensitivität ohne Crowding-out entsprechend geringer ausfallen.

4.3.6 Die gemeinsame Wirkung von Klimaschutz, der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzter Anpassung

Die gemeinsamen Auswirkungen ergeben sich wie in Abbildung 49 zu erkennen aus der Addition der Einzeleffekte für die Extremwetterereignisse, die Anpassung und den Klimaschutz. Die nachfolgende Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen, dass die gesamtwirtschaftlichen Wirkungen des Klimaschutzes insbesondere bis zum Jahr 2035 deutlich höher ausfallen als die Effekte von zusätzlichen Extremwetterereignissen und Anpassung, die zum Ende des Betrachtungszeitraums immer größer werden. Während zusätzliche Extremwetterereignisse gesamtwirtschaftlich negativ wirken und Anpassungsmaßnahmen diese Effekte zum Teil ausgleichen, wirkt der Klimaschutz bei Annahme der

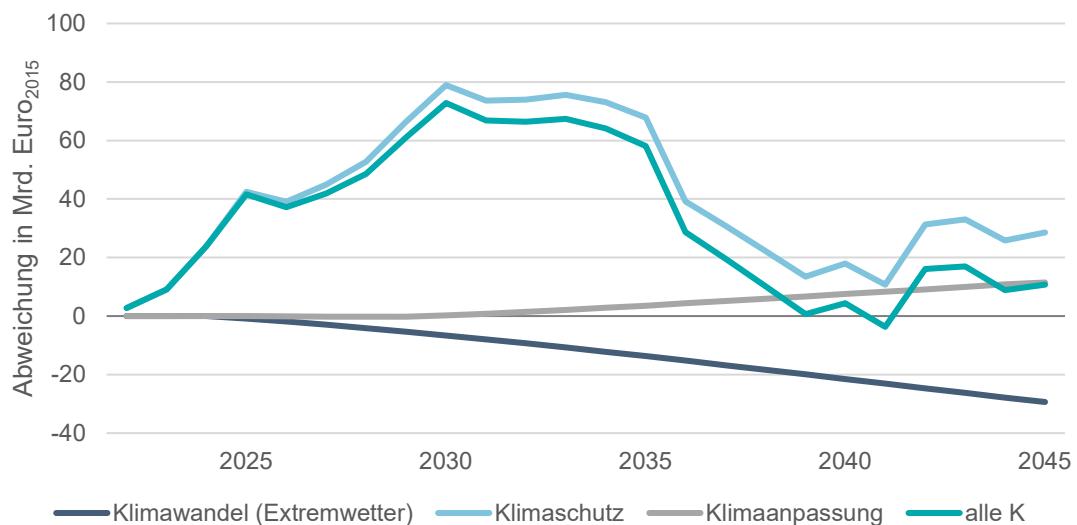
Zusätzlichkeit der Investitionen gesamtwirtschaftlich positiv (Abbildung 49 und Abbildung 50).

Abbildung 49: Kumulierte Abweichung im realen Bruttoinlandsprodukt 2024-2045 (in Mrd. Euro, auf 10 gerundet)



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Abbildung 50: Effekte der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, der vereinfacht abgeschätzten Anpassung und des Klimaschutzes (Scen5) auf das BIP



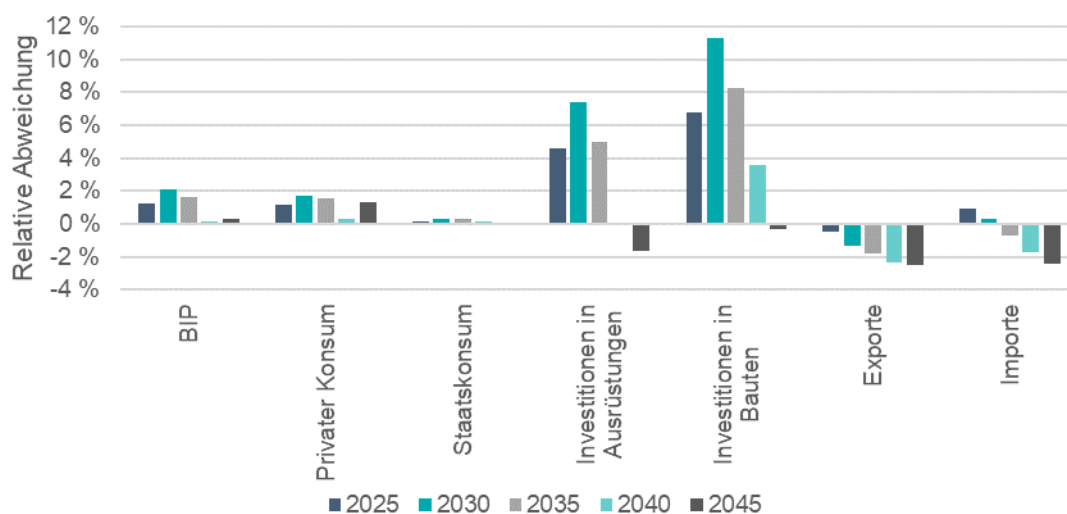
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Die Gesamtwirkung auf das BIP wird vor allem von den höheren Investitionen und dem höheren privaten Konsum getrieben (Abbildung 51). Dagegen liegen die Exporte deutlich niedriger, weil einerseits durch den Klimaschutz und damit die höheren CO₂-Preise, Löhne und die höheren Abschreibungen Deutschland relativ zu anderen Ländern an Wettbewerbsfähigkeit verliert und andererseits der Klimawandel den internationalen Handel erschwert. Auch die Importe liegen niedriger als in der Referenz, weil weniger

fossile Energieträger importiert werden und der Klimawandel auch die Importe beeinträchtigt.

Das Ergebnis sollte nicht dahingehend interpretiert werden, dass es keinerlei Interdependenzen zwischen den gesamtwirtschaftlichen Effekten von Extremwetter, Anpassung und Klimaschutz gibt. Allerdings sind die Dimensionen von Anpassung und Klimaschutz sehr unterschiedlich und fallen die Zusammenhänge zwischen nationalem Klimaschutz und durch den globalen Temperaturanstieg induzierten Klimawandel auch in der zeitlichen Dimension auseinander. Ambitionierter internationaler Klimaschutz ist die einzige Möglichkeit, den Klimawandel zumindest längerfristig abzubremesen.

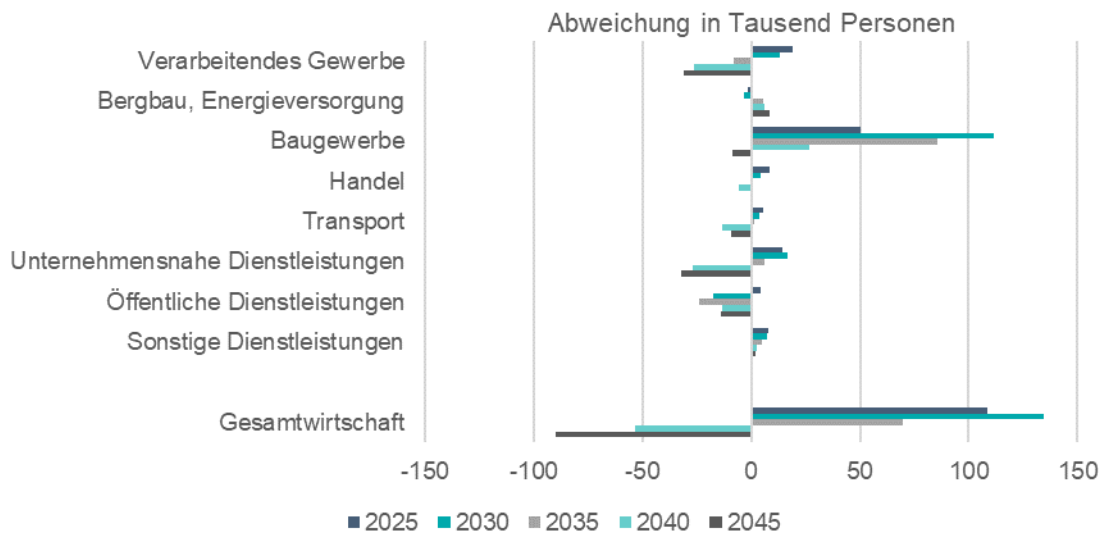
Abbildung 51: Relative Abweichungen im Bruttoinlandsprodukt und seiner Komponenten durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, Anpassung und Klimaschutz für ausgewählte Jahre



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Hinsichtlich der Beschäftigungseffekte lässt sich anders als beim BIP kein durchwegs positiver Verlauf erkennen. Vielmehr fallen sie zum Ende des Betrachtungszeitraums leicht negativ aus (Abbildung 52). Dies ist vor allem auf die Abweichungen im verarbeitenden Gewerbe, im Transport sowie in unternehmensnahen und öffentlichen Dienstleistungen zurückzuführen. Neben der Produktionsentwicklung spielt hier auch die Reallohnentwicklung eine Rolle.

Abbildung 52: Veränderung in der Beschäftigung nach Branchen durch die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, Anpassung und Klimaschutz (in 1000 Personen)



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

4.4 Wirkung der Szenarien auf das Produktionspotenzial

4.4.1 Methodik

Das Produktionspotenzial soll das Produktionsvolumen einer Volkswirtschaft bei Normalauslastung der Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital wiedergeben. Diese Kenngröße ist nicht Teil der von den statistischen Ämtern erstellten Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen, sondern muss aus deren Zeitreihen mittels ökonometrischer Verfahren abgeleitet werden. Vergleichsweise aufwändig ist die Methode, welche von der EU-Kommission im Rahmen der regelmäßigen Überwachung der Staatsfinanzen vorgesehen ist (Havik et al. 2014) und welche auch von der Bundesregierung für die Bestimmung des Potenzialwachstums im Rahmen der gesamtwirtschaftlichen Vorausschätzungen in der Regel dreimal im Jahr verwendet wird (BMWK & BMF 2024).

Die folgende Analyse untersucht die Effekte der in den Szenarien implementierten Impulse auf das Produktionspotenzial (und seine Komponenten). Die Differenzen zwischen den Potenzialgrößen (der verschiedenen Szenarien) stehen hier im Vordergrund. Für diesen Zweck haben wir das Produktionspotenzial in Absprache mit dem Auftraggeber mittels einer einfacheren Methode bestimmt: Mittels eines Hodrick-Prescott-Filters ($\lambda = 100$) werden die vom Modell PANTA RHEI generierten relevanten Zeitreihen (hier: Bruttoinlandsprodukt, Arbeitsvolumen, Bruttoanlagevermögen) in ihre Trend- und Zyklus-Komponenten zerlegt. Die ermittelten Trendkomponenten werden als Potenzialgrößen

interpretiert, während der Wachstumsbeitrag der Totalen Faktorproduktivität als Residualgröße berechnet wird.²⁵

Diese Vorgehensweise für die Potenzialbestimmung reduziert den Aufwand gegenüber der Methode der EU-Kommission beträchtlich. Im Ergebnis sind die berechneten Kenngrößen sehr ähnlich: die folgende Tabelle gibt die Korrelation zwischen den nach den beiden Methoden berechneten Wachstumsbeiträgen der Totalen Faktorproduktivität für die verschiedenen Szenarien wieder.²⁶ Auch die Abweichungen des Wachstumsbeitrages gegenüber dem Referenzszenario korrelieren zwischen beiden Methoden sehr stark.

Tabelle 19: Korrelation des Wachstumsbeitrages der Totalen Faktorproduktivität nach verwendeter Methode

Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8
EU-Methode zu HP-Filter	0,89	0,91	0,90	0,97	0,97	0,97	0,97	0,92
Abweichung zu Szenario 1		0,96	0,88	0,96	0,96	0,97	0,96	0,98

Quelle: Eigene Berechnungen Prognos

Die große Ähnlichkeit zwischen den nach beiden Methoden berechneten Potenzialgrößen erlaubt somit Analogieschlüsse der im Folgenden diskutierten Effekte auf das nach der EU-Methode berechnete Produktionspotenzial.

4.4.2 Ergebnisse im Referenzszenario

Das Referenzszenario in PANTA RHEI schreibt im Wesentlichen die beobachteten Zusammenhänge in die Zukunft fort. Es handelt sich um eine Trendprojektion. Verhaltensgleichungen werden auf Basis historischer Zeitreihen geschätzt. Die Exportentwicklung, die exogen vorgegeben wird, verläuft langsamer als in der Vergangenheit. Es ergeben sich folgende modellendogene Ergebnisse in konstanten Preisen. Die Importe steigen leicht schneller als die Exporte, sodass der Außenhandel als Wachstumsmotor ausfällt. Bereits seit 2007 bewegt sich der deutsche Außenhandelsüberschuss weitgehend

²⁵ Die Veränderung der Totalen Faktorproduktivität entspricht der Veränderung des Bruttoinlandsprodukts abzüglich der einkommensanteilgewichteten Veränderung der beiden Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital. Der Einkommensanteil des Produktionsfaktors Arbeit ist die Lohnsumme in Relation zum nominalen Bruttoinlandsprodukt (korrigiert für Selbstständigeneinkommen), der Einkommensanteil des Produktionsfaktors Kapital entspricht der Restgröße zu 100 %. Für die Berechnung der jährlichen Veränderung der Totalen Faktorproduktivität wird jeweils der Mittelwert der Einkommensanteile der beiden betreffenden Jahre verwendet. Die Verwendung der Einkommensanteile respektive die Nicht-Verwendung einer gesetzten und im Zeitverlauf konstanten «Produktionselastizität» (in der EU-Methode: 0,65 für den Produktionsfaktor Arbeit und 0,35 für den Produktionsfaktor Kapital) folgt der Einsicht, dass gesamtwirtschaftliche Produktionsfunktionen keine empirische Entsprechung aufweisen und entsprechende Schätzungen der Funktionen lediglich Identitäten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen widerspiegeln (und keine «technischen» Charakteristika der betreffenden Volkswirtschaft) (siehe Felipe & McCombie 2013 sowie Guerrien & Gun 2015).

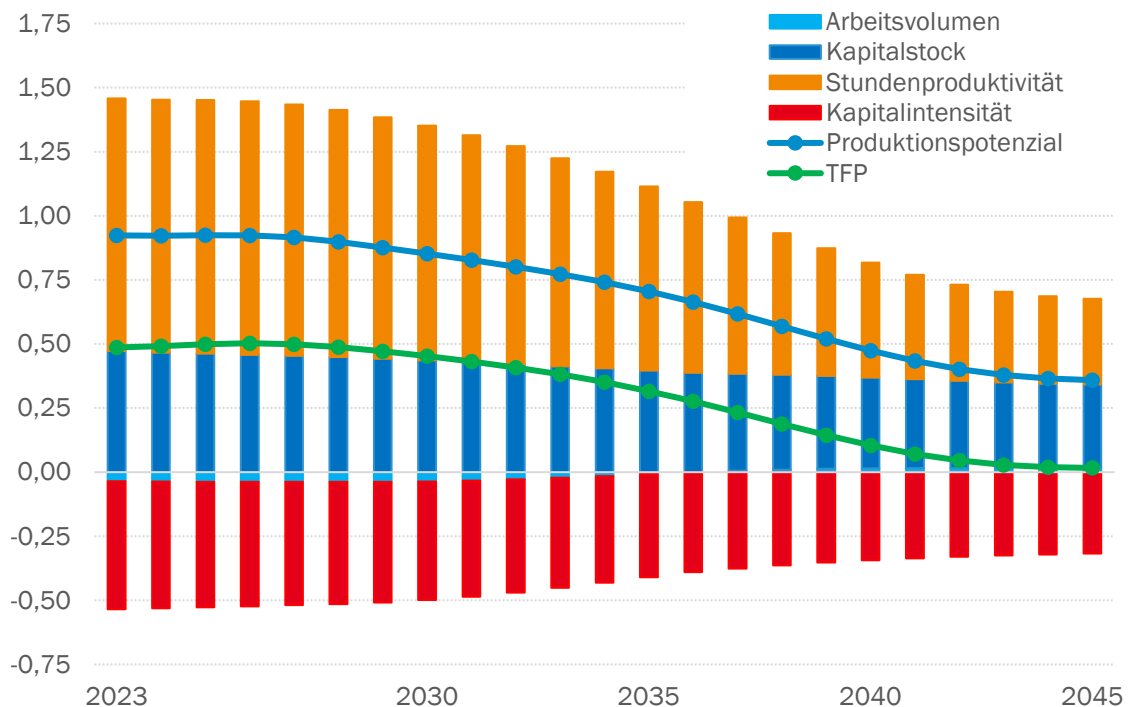
²⁶ Auf der Basis vorläufiger Szenarienergebnisse hat das BMWK einmalig das Produktionspotenzial (und seine Komponenten) nach einem Produktionsfunktionsansatz in Anlehnung an die EU-Methode berechnet und zur Verfügung gestellt.

seitwärts, was sich in Zukunft fortsetzt. Der private Konsum wächst weitgehend mit dem BIP. Die Bauinvestitionen sind nach 2030 auch bedingt durch den demografischen Wandel leicht rückläufig, während die Ausrüstungsinvestitionen und noch mehr die sonstigen Ausrüstungen, die u.a. geistiges Eigentum enthalten, wie schon in der Vergangenheit schneller wachsen als das BIP. Insgesamt steigt die gesamtwirtschaftliche Kapitalintensität an. Die Zahl der geleisteten Arbeitsstunden stagniert zukünftig, wobei eine höhere Erwerbsbeteiligung und der verstärkte Einsatz von ausländischen Beschäftigten angenommen werden. Im Vergleich zur Potenzialschätzung des Sachverständigenrat (2023, S. 111) fällt auf, dass dort das Arbeitsvolumen deutlich rückläufig ist und die Investitionen stärker zunehmen. Im Modellkontext wird das Wachstum von BIP und Produktionspotenzial ohne Impulse aus dem Ausland und durch neue Technologien zukünftig sinken, wie die Trendprojektion zeigt. Sicherlich ist zu erwarten, dass z.B. durch den Einsatz künstlicher Intelligenz das Potenzialwachstum in Zukunft wieder zunehmen kann, was aber in der Referenz nicht unterstellt ist.

Die folgende Abbildung beschreibt die Beiträge der Produktionsfaktoren Arbeit (hellblau) und Kapital (dunkelblau) sowie der Totalen Faktorproduktivität (grün) zum Wachstum des Produktionspotenzials in der Referenz. Die Totale Faktorproduktivität (TFP) gibt den Anteil der Zunahme des Produktionspotenzials wieder, der nicht durch die Zunahme der Produktionsfaktoren Arbeit (Arbeitsvolumen in Stunden) und Kapitalstock (Bruttoanlagevermögen) erklärt werden kann. Der Wachstumsbeitrag der TFP kann definitorisch in die Veränderung der Stundenproduktivität (orange) abzüglich der einkommensanteilgewichteten Veränderung der Kapitalintensität (rot) zerlegt werden.

Abbildung 53 verdeutlicht, dass die Veränderung des Arbeitsvolumens nur einen geringen Beitrag zum Potenzialwachstum leistet, wobei der Beitrag bis 2032 leicht negativ ist, um danach wieder leicht positiv zu werden. Der Produktionsfaktor Kapital leistet einen größeren Beitrag, der von 0,47 Prozentpunkten im Jahr 2023 auf 0,33 Prozentpunkte im Jahr 2045 kontinuierlich absinkt. Der Beitrag der Stundenproduktivität nimmt von fast 1 Prozentpunkt p.a. in den Jahren 2023 bis 2026 zunächst bis 2030 nur leicht ab, bevor er ab 2030 schneller zurückgeht. Der Anstieg der Kapitalintensität entwickelt sich mit umgekehrten Vorzeichen ähnlich wie der Kapitalbeitrag.

Abbildung 53: Wachstumszerlegung des Produktionspotenzials in der Referenz (Scen1) (in % bzw. bei den Komponenten in Prozentpunkten)



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Im Vergleich zur Frühjahrsprojektion der Bundesregierung (BMWK & BMF 2024), die die Entwicklung des Produktionspotenzials bis zum Jahr 2028 abschätzt, liegen das TFP-Wachstum und auch das Wachstum des Produktionspotenzials in den Jahren 2024 bis 2028 etwas höher, während die Beiträge der Faktoren Arbeit und Kapital in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Die ausgewiesene Entwicklung ist bis zum Jahr 2030 ähnlich wie im Ageing Report (European Commission 2023) für Deutschland ermittelt. In den Jahren danach weist der Ageing Report ein deutlich höheres Potenzialwachstum aus, welches maßgeblich durch eine starke Beschleunigung des unterstellten Produktivitätsfortschritts getrieben wird. Die Ergebnisse liegen also in einer Bandbreite, die sich in der Literatur wiederfindet. Es ist an dieser Stelle aber darauf hinzuweisen, dass die Referenzentwicklung in PANTA RHEI keine kurzfristigen konjunkturellen Veränderungen am aktuellen Rand fortschreibt, weil keine Vierteljahresdaten genutzt und zentrale Vorgaben wie die Exportentwicklung geglättet fortgeschrieben werden. Zyklische Zusammenhänge in Form von Multiplikator- oder Akzeleratoreffekten auf Jahresebene etwa durch schwankende Investitionstätigkeit bei hoher oder niedriger Auslastung des Produktionspotenzials werden aber erfasst.

4.4.3 Modellzusammenhänge in PANTA RHEI

In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, wie Extremwetterereignisse, Anpassung an diese durch Klimawandel bedingte Extremwetterereignisse sowie der Klimaschutz in den oben beschriebenen Szenarien die Entwicklung des Produktionspotenzials verändern. Dazu ist es wichtig zu verstehen, wie im Modell PANTA RHEI, das nicht in erster Linie zur Bestimmung des Produktionspotenzials gedacht ist, der Arbeitsmarkt und der

Kapitaleinsatz abgebildet werden (vgl. auch Abschnitt 4.2.4). Für die Erfassung der Wirkungen der Klimaaspekte auf das Produktionspotenzial erscheint es aber geeignet, weil Extremwetterereignisse, die Anpassung daran und Klimaschutz sich auf einige unterschiedliche Wirtschaftsbereiche konzentrieren, was ein Strukturmodell besser erfassen kann als gesamtwirtschaftliche Wachstumsmodelle ohne (ausreichende) Sektordifferenzierung. Außerdem schreibt es alle Größen fort, die zur Bestimmung des Produktionspotenzials benötigt werden.

Der Ansatz unterscheidet sich deutlich von partiellen makroökonomischen Modellen zur Schätzung des langfristigen Wachstums (wie z.B. Bönke et al. 2023). Es gibt in PANTA RHEI keine Produktionsfunktion, in der das BIP und die Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital direkt verknüpft sind. Arbeitseinsatz, Kapitaleinsatz und BIP werden separat bestimmt. Durch das Gleichungssystem hängen sie aber natürlich zusammen. Die Totale Faktorproduktivität, die Stundenproduktivität und die Kapitalintensität ergeben sich somit definitorisch. Das BIP wird verwendungsseitig berechnet. Der Arbeitseinsatz wird modellendogen ermittelt.

Auf dem Arbeitsmarkt werden in PANTA RHEI das Arbeitsvolumen und die Lohnentwicklung nach 63 Wirtschaftsbereichen berechnet. Die geschätzten Parameter sind je Wirtschaftsbereich unterschiedlich. Das Jahresarbeitsvolumen nach Wirtschaftsbereichen hängt positiv von der Produktionsentwicklung, mit Elastizitäten kleiner eins, negativ vom Reallohn und einem Zeittrend ab, soweit die Zusammenhänge in der Vergangenheit signifikant waren. Mit den durchschnittlichen Jahresarbeitszeiten lässt sich die Zahl der Erwerbstätigen pro Wirtschaftsbereich aus dem Arbeitsvolumen berechnen.

Die Lohnentwicklung wird zweistufig abgebildet. Zunächst wird der gesamtwirtschaftlich durchschnittliche Lohnsatz in einem Philippskurvenansatz durch die Entwicklung der Arbeitsproduktivität, als Verhältnis von Bruttoproduktion in konstanten Preisen zu Arbeitseinsatz in Stunden, des Preisindex der Lebenshaltung und der Erwerbslosenquote erklärt. Der Lohnsatz steigt also mit der Arbeitsproduktivität und dem Preisniveau. Die Lohnentwicklung hängt außerdem negativ von der Erwerbslosenquote ab. In einer zweiten Stufe werden die Lohnsätze in den einzelnen Wirtschaftsbereichen in Abhängigkeit vom Durchschnittslohnsatz und der bereichsspezifischen Stundenproduktivität bestimmt.

Die Entwicklung der Stundenproduktivität pro Wirtschaftsbereich als Quotient aus Produktion und Arbeitsvolumen ist im Modell anders als in üblichen Ansätzen zur Bestimmung der Potenzialentwicklung keine exogene Vorgabe oder wird durch Annahmen zu technischen Veränderungen getrieben. Sie steigt c.p. mit höherer Produktion, weil das Arbeitsvolumen weniger wächst als die Produktion. Die Entwicklung der Stundenproduktivität und des Reallohns sind wechselseitig miteinander verknüpft. Sie reagieren auf einen positiven Impuls wie höhere Investitionsnachfrage und dadurch höhere Produktion in gleicher Richtung und ähnlicher relativer Änderung. Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene entspricht die Stundenproduktivität dem Bruttoinlandsprodukt pro Arbeitsstunde.

Die Bruttoanlageinvestitionen werden in PANTA RHEI getrennt für Ausrüstungen, Bauten und sonstige Anlagen (insbesondere in Form von geistigem Eigentum) modelliert. Auf Ebene der Wirtschaftsbereiche werden sie in Abhängigkeit der jeweiligen Produktion geschätzt und für einzelne Wirtschaftsbereiche werden zusätzlich der Kapitalstock und ein Zeittrend als erklärende Größen einbezogen, wenn sie in den Schätzungen

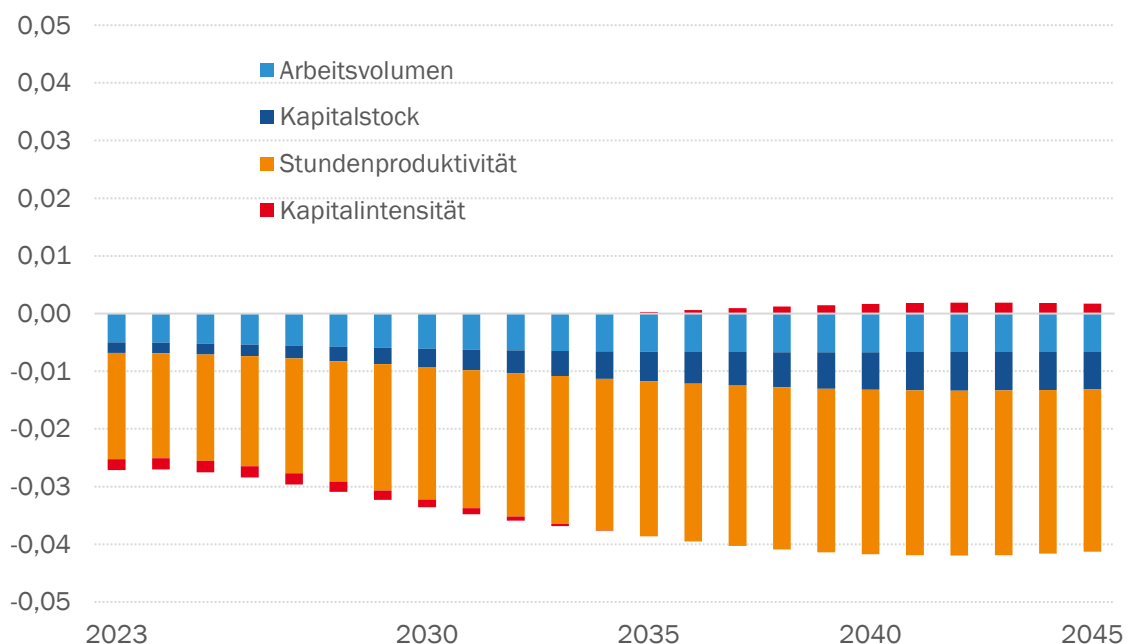
statistisch signifikant sind. Die Investitionen werden über bereichsspezifische Zeiträume abgeschrieben und die Abschreibungen gehen in die Kostenkalkulation der Wirtschaftsbereiche ein. Die Preise werden mittels eines Aufschlags auf die Stückkosten festgelegt. Die Abgänge vom Kapitalstock werden über feste Abgangsquoten des Jahres 2023 jeweils für Ausrüstungen und Bauten insgesamt berechnet. Das Bruttoanlagevermögen ergibt sich aus dem Vorjahreswert durch Hinzurechnen der Bau- und Ausrüstungsinvestitionen abzüglich der Abgänge. Das Bruttoanlagevermögen wird nachrichtlich berechnet und hat im Modell keinen Einfluss auf andere Modellgrößen. Zusätzliche Investitionen in Anpassung an Extremwetterereignisse und Klimaschutz werden außerhalb des Modells bestimmt (vgl. Abschnitte 4.2.3 und 4.2.4).

Außerdem ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass auf der Ebene der Wirtschaftsbereiche modelliert wird, es also zu Struktureffekten kommen kann, wenn Branchen überdurchschnittlich durch Klimawandel, Anpassung oder Klimaschutz betroffen sind bzw. profitieren.

4.4.4 Ergebnisse für die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und vereinfacht abgeschätzte Anpassung

Die im Szenario 2 aufgrund des Klimawandels unterstellten zusätzlichen Extremwetterereignisse reduzieren vor allem die Stundenproduktivität. Kapitaleinsatz und Arbeitseinatz gehen nur leicht zurück (Abbildung 54).

Abbildung 54: Wirkung der der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignisse (Scen2_EW) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)



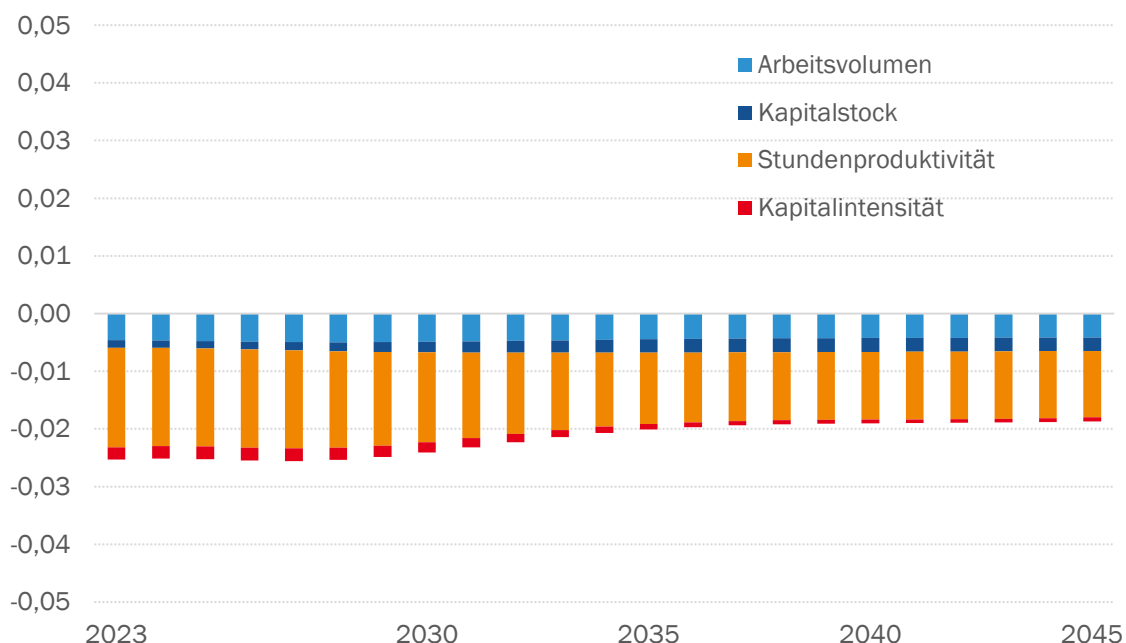
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Die Arbeitsproduktivität entwickelt sich vor allem in besonders dem Extremwetter ausgesetzten Bereichen wie der Land- und Forstwirtschaft, der Schifffahrt, dem

Versicherungsgewerbe sowie in diesen Bereichen nachgelagerten Branchen wie der Nahrungsmittelerzeugung, der Herstellung von Holzwaren und der Herstellung von Möbeln deutlich negativ im Vergleich zur Referenz. Das ist aus unserer Sicht plausibel, weil die Verringerung der Arbeitsproduktivität als ein zentraler Wirkungskanal von zunehmenden Extremwetterereignissen aufgrund des Klimawandels laut Abschnitt 3.1.2 angesehen wird. Aber auch in anderen Branchen wie dem Fahrzeugbau oder der Bauwirtschaft entwickelt sich die Arbeitsproduktivität etwas weniger positiv. Der Arbeitseinsatz ist mit der niedrigeren Produktion leicht niedriger als in der Referenz. Die Kapitalintensität nimmt zunächst leicht zu und geht ab 2035 wieder leicht im Vergleich zur Referenz zurück, wobei die Effekte sehr klein sind.

Die quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen und die Anpassung daran zusammen (Scen3_EWA) führen ebenfalls zu einem Rückgang der Stundenproduktivität sowie des Kapitalbeitrags gegenüber der Referenz, die allerdings deutlich kleiner ausfallen als ohne Anpassung (Abbildung 55). Die inländischen Schäden etwa in der Schifffahrt, im Baugewerbe, im Fahrzeugbau und bei den Versicherungen werden durch Anpassung mit einer gewissen Zeitverzögerung reduziert, was sich in einem geringeren Rückgang der Arbeitsproduktivität sowie des Kapitalbeitrags gegenüber der Referenz als in Szenario 1 zeigt. Die Zeitverzögerung erklärt, warum die Effekte ab 2030 kleiner werden. Beim Arbeitsvolumen führt Anpassung kaum zu einer Änderung gegenüber dem Szenario nur mit zunehmenden Extremwetterereignissen.

Abbildung 55: Wirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen des und der vereinfacht abgeschätzten Anpassung daran (Scen3_EWA) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)



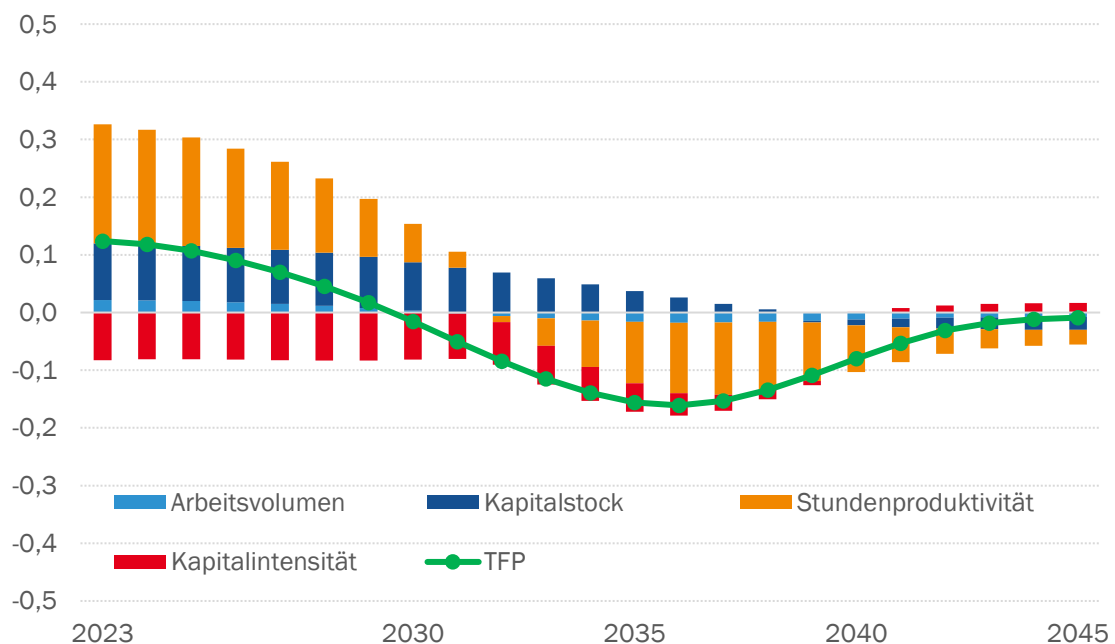
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

4.4.5 Ergebnisse für Klimaschutz

Die Wirkung des Klimaschutzes (Scen4_KS) liefert ein weniger kontinuierliches Bild, was mit dem zeitlichen Verlauf des Klimaschutzszenarios zu tun hat (Abbildung 56). Bis zum Jahr 2031 ist der Wachstumsbeitrag der Stundenproduktivität größer als in der Referenz und sinkt über die Zeit, während er danach niedriger liegt. Er entwickelt sich parallel zur relativen Abweichung des BIP gegenüber der Referenz, die 2030 ein Maximum erreicht und danach zurückgeht (Abbildung 57). Der Kapitalbeitrag steigt bis 2038 und wird ab 2040 negativ. Da sich der Beitrag des Arbeitseinsatzes bis 2030 nur leicht erhöht und er danach leicht niedriger liegt als in der Referenz, steigt die Kapitalintensität bis zum Jahr 2040, bevor sie mit dem negativen Kapitalbeitrag zurückgeht. Der Wachstumsbeitrag der Totalen Faktorproduktivität ist bis 2030 positiv und wird danach negativ.

Die Investitionen liegen dabei bis Ende der 2030er Jahre höher als in der Referenz, danach niedriger, was sich im Kapitalbeitrag (dunkelblau) in der Abbildung zeigt. Die Investitionsdifferenz zur Referenz sinkt dabei nach 2035 deutlich ab, was sich auch im stark zurückgehenden Wachstumsimpuls zeigt (Abbildung 56). Die Zunahme der Klimaschutzinvestitionen gegenüber der Referenz bis 2040 wird aus der Bottom-up Modellierung übernommen.

Abbildung 56: Wirkung des Klimaschutzes (Scen4_KS) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Der positive Wachstumsbetrags des Kapitals ist erwartbar, da im Klimaschutzszenario erhebliche zusätzliche Investitionen getätigt werden. Dahingegen ist der Beitrag einer gestiegenen Stundenproduktivität bis 2030 überraschend, jedenfalls insoweit dieser nicht von der gestiegenen Kapitalintensität stammt. Im Folgenden erläutern wir, wie dieser zustande kommt.

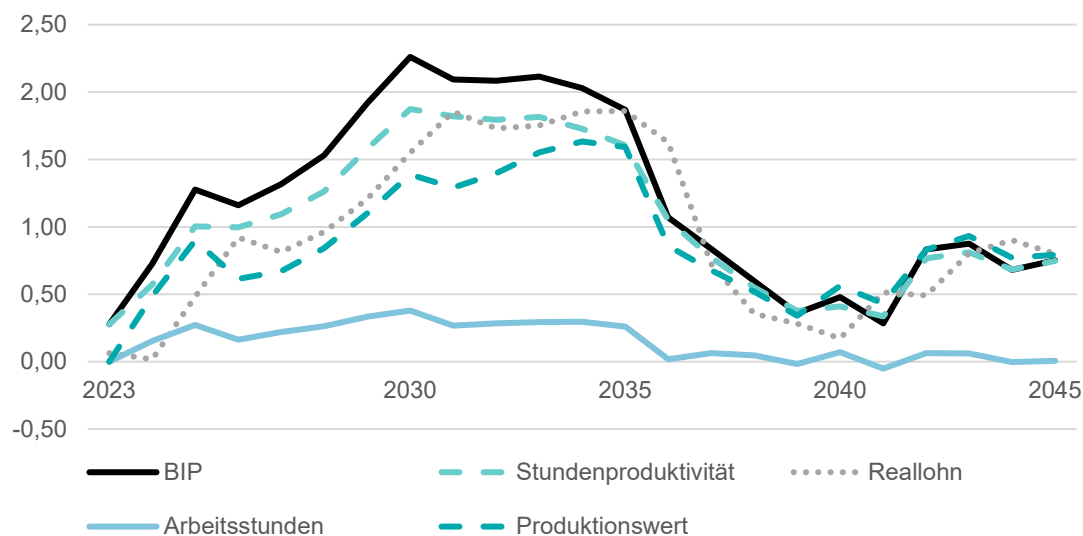
Der Klimaschutz führt zunächst über höhere Investitionen zu höherem BIP, höherer Produktion, höheren Produktionspreisen, vor allem in CO₂-intensiven Wirtschaftsbereichen durch höhere CO₂- und Strompreise und höhere Abschreibungen, und auch zu höheren Stundenlöhnen, die neben der Produktivitätsentwicklung auch von der Entwicklung des Verbraucherpreisindex abhängen (vgl. Abschnitte 4.3.4 und 4.4.3). Wie oben beschrieben, hängt die Arbeitsnachfrage in PANTA RHEI positiv von der Produktionsentwicklung mit Elastizitäten kleiner eins und negativ von der Reallohnentwicklung ab. Beide Effekte gleichen sich teilweise aus, weil der Klimaschutz sowohl zu höherer Produktion und höherem BIP als auch zu höheren Reallöhnen führt. Die Zahl der Arbeitsstunden (wie der Beschäftigten) reagiert deshalb sehr viel schwächer als der Produktionswert, der bis zum Jahr 2035 durch den Klimaschutz gegenüber der Referenz weiter zunimmt. Durch das höhere BIP und mit den höheren Reallöhnen liegt auch die Stundenproduktivität höher als in der Referenz.

Im Ergebnis steigt in PANTA RHEI die Stundenproduktivität, die sich definitorisch aus BIP und Arbeitsstunden ergibt, gegenüber der Referenz bis zum Jahr 2030. Nach 2030 sinkt sie im Vergleich zur Referenz zunächst leicht, bevor die Differenz zwischen 2035 und 2039 deutlicher zurückgeht (Abbildung 57). Bis 2045 bleibt die Stundenproduktivität höher als in der Referenz. Zentraler Grund sind die höheren Preise und Stundenlöhne, die trotz höherer Produktion die Arbeitsnachfrage dämpfen und damit die Stundenproduktivität erhöhen. Ein weiterer Grund ist die dauerhaft höhere Energieproduktivität, deren Rolle im nächsten Abschnitt kurz angesprochen wird, wo der hier dominierende Effekt zusätzlicher Investitionen nicht wirkt.

Durch die unterschiedliche Struktur der Investitionen im Vergleich zur Referenz kommt es bis 2036 durch die deutlich höheren Investitionen auch zu Verschiebungen in der Beschäftigungsstruktur. Im Baugewerbe, im Grundstücks- und Wohnungswesen, bei Architektur- und Ingenieurbüros und in Investitionsgüterbereichen wie der Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, Herstellung von Glas, Keramik und Maschinenbau liegt die Beschäftigung höher als in der Referenz. In diesen Bereichen ist die Stundenproduktivität überwiegend höher als im Durchschnitt. Dagegen liegt die Beschäftigung in Bereichen mit niedrigen Stundenproduktivitäten wie Heimen und Sozialwesen sowie bei unternehmensnahen Dienstleistungen etwas niedriger. Mit dieser Verschiebung steigt die durchschnittliche Stundenproduktivität leicht an. In den Jahren 2024 bis 2035 kann dieser Struktureffekt bei zeitlich abnehmender Tendenz rund 15% bis 35% des Anstiegs der Stundenproduktivität im Vergleich zur Referenz erklären. Danach ist der Struktureffekt mit Auslaufen der zusätzlichen Investitionen nur noch gering.

Der Vorzeichenwechsel bei der Entwicklung des Wachstumsbeitrags der Stundenproduktivität lässt sich somit durch verschiedene Gründe erklären, am stärksten durch den zeitlichen Verlauf des Investitionsimpulses mit den damit verbundenen Wirkungen auf die Stundenproduktivität in allen Wirtschaftsbereichen und den Struktureffekten hin zu Branchen mit höherer Arbeitsproduktivität.

Abbildung 57: Wirkung des Klimaschutzes (Scen4_KS) auf BIP, Stundenproduktivität, Reallohn, Arbeitsstunden und Produktionswert gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)



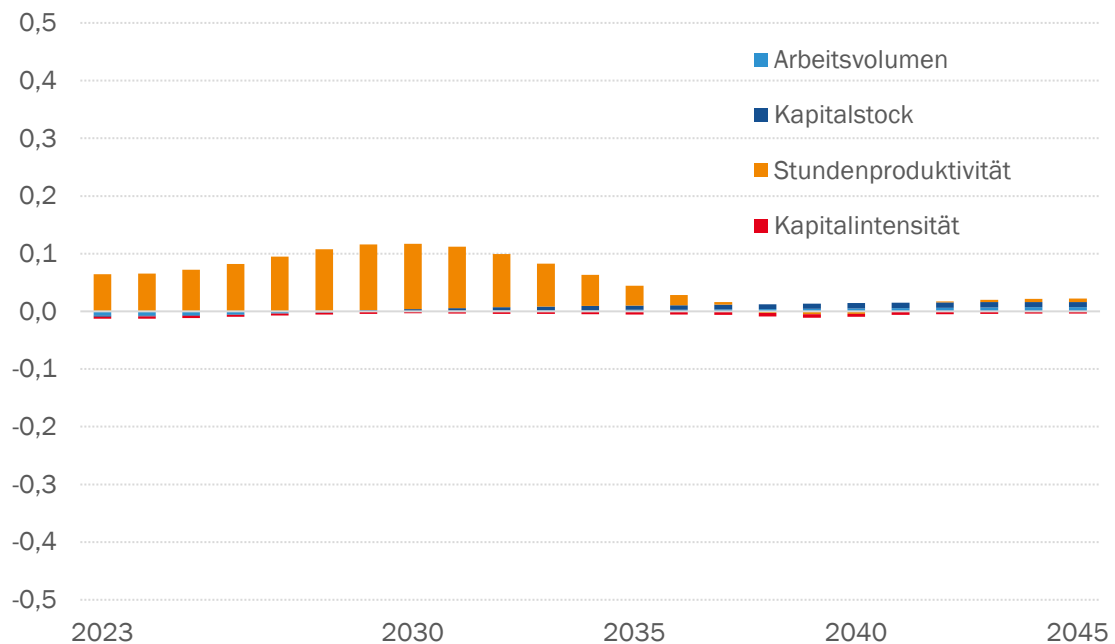
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

4.4.6 Ergebnisse für Klimaschutz mit Crowding-out

Wesentlicher Unterschied der Sensitivität im Vergleich zum im vorherigen Abschnitt beschriebenen Szenario zum Klimaschutz ist die Annahme, dass die Klimaschutzinvestitionen nicht zusätzlich sind, sondern andere Investitionen vollständig verdrängen. Die Investitionen in den Klimaschutz führen entsprechend der Ergebnisse der Energiesystemmodellierung zu einer Zunahme der Energieeffizienz gegenüber den verdrängten Investitionen, sind also in diesem Punkt produktiver als die verdrängten Investitionen. Dies ist bei Elektroautos oder Wärmepumpen technologisch bedingt. Andere Unterschiede zwischen den Klimaschutzinvestitionen und den verdrängten Investitionen werden nicht unterstellt. Bei dieser Annahme, die das positive gesamtwirtschaftliche Ergebnis des Szenarios wesentlich bestimmt, ist durchaus kritisch zu hinterfragen, warum die Klimaschutzinvestitionen in der Referenz ausbleiben, wenn sie doch lohnend sind. Ein Grund könnte darin liegen, dass Investoren einen kurzfristigen Entscheidungshorizont haben könnten, indem sie die längerfristigen einzel- und gesamtwirtschaftlichen Vorteile der Klimaschutzinvestitionen nicht berücksichtigen. Die Annahme ist für die gesamten Klimaschutzinvestitionen aber sicher optimistisch und erklärt auch teilweise die gesamtwirtschaftlich positiven Effekte.

Die Wirkung des Klimaschutzes bei vollständigem Crowding-out (Scen8_KS) zeigt einen Anstieg des Wachstumsbeitrags der Stundenproduktivität bis 2030 gegenüber der Referenz, der danach wieder geringer wird und ab 2036 dicht bei null liegt (Abbildung 58). Mit dem höheren BIP steigen dann auch Arbeitseinsatz und (induzierter) Kapitaleinsatz leicht an.

Abbildung 58: Wirkung des Klimaschutzes mit Crowding-out (Scen8_KS) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)



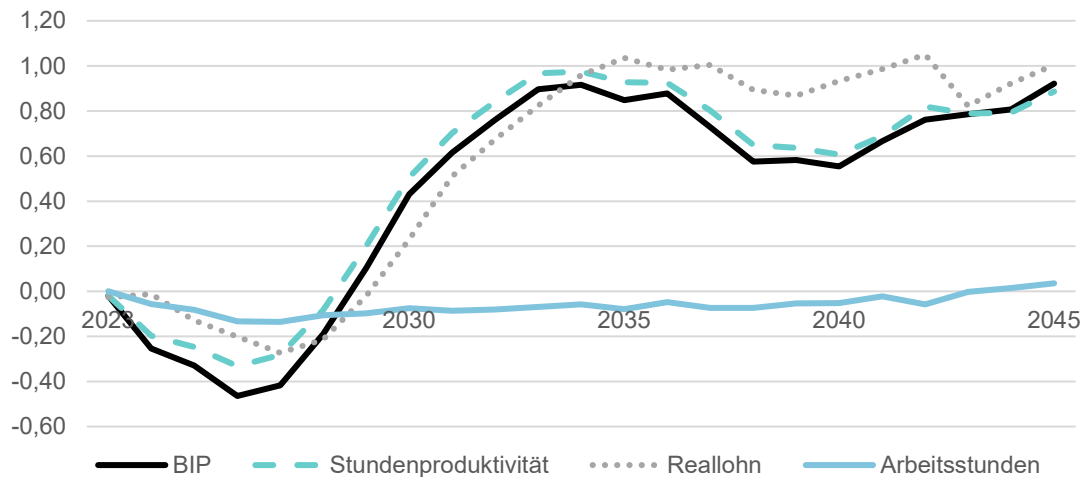
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

Als Folge zunächst niedrigerer Nachfrage durch die höheren CO₂- und Strompreise und damit auch niedrigere Produktion geht im Modell die Nachfrage der Unternehmen nach Arbeitskräften im Vergleich zur Referenz leicht zurück. Die Produktionspreise liegen zunächst etwas höher und das BIP etwas niedriger als in der Referenz. Durch die Verschiebung der Investitionen und damit auch der Produktion hin zu Klimaschutzgütern gibt es einen leichten Struktureffekt hin zu Branchen mit höherer Stundenproduktivität. Da auch dadurch die gesamtwirtschaftliche Stundenproduktivität im Vergleich zur Referenz weniger zurückgeht als das BIP, ist der Wachstumsbeitrag der Stundenproduktivität von Beginn an leicht positiv. Im Jahr 2026 erreicht die Abweichung von der Referenz beim BIP den Tiefpunkt, bevor es ab 2030 höher liegt. Treiber für den Anstieg vor 2030 sind verwendungsseitig vor allem die niedrigeren Energieimporte, die c. p. das BIP erhöhen, aber ab 2030 auch etwas höhere Exporte, Konsumausgaben und Investitionen. Die höhere Energieeffizienz und der Wechsel auf die erneuerbaren Energien, die weniger importiert werden müssen, und damit ein insgesamt niedrigerer Energieverbrauch sind über niedrigere Importe wichtige Treiber des höheren BIP und damit indirekt auch der höheren Stundenproduktivität. Wie im Szenario ohne Crowding-out führen die oben beschriebenen Modellzusammenhänge auf dem Arbeitsmarkt dazu, dass sich das etwas höhere BIP auch wegen höherer Reallohne nicht in höherer Beschäftigung niederschlägt, sondern in höherer Stundenproduktivität zeigt. Der Arbeitseinsatz liegt bis 2042 niedriger als in der Referenz, was am höheren Reallohn liegt.

Durch die unterschiedliche Struktur der Investitionen im Vergleich zur Referenz kommt es auch zu leichten Verschiebungen in der Beschäftigungsstruktur. Bei der Herstellung von Metallerzeugnissen und elektrischen Ausrüstungen liegt sie von Beginn an, im Baugewerbe und bei unternehmensnahen Dienstleistungen ab 2030 leicht höher, bei

öffentlichen und sonstigen Dienstleistungen durchgehend leicht niedriger. Mit dieser Verschiebung steigt die durchschnittliche Stundenproduktivität leicht an. Bis 2030 trägt dieser Effekt etwa 25% zur höheren Stundenproduktivität bei, danach sinkt der Beitrag auf unter 10%.

Abbildung 59: Wirkung des Klimaschutzes mit Crowding-out (Scen8_KS) auf BIP, Arbeitsstunden und Stundenproduktivität gegenüber der Referenz (Scen1) (in Prozentpunkten)



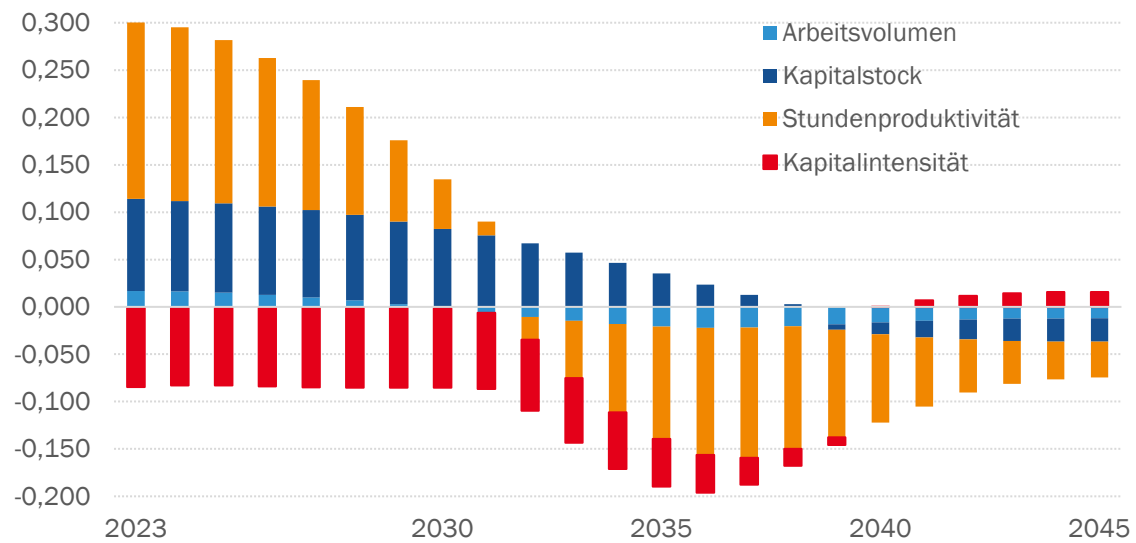
Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

4.4.7 Ergebnisse der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, vereinfacht abgeschätzte Anpassung und Klimaschutz

Die kombinierte Wirkung von quantifizierbaren Effekten zusätzlicher Extremwetterereignissen, vereinfacht abgeschätzter Anpassung und Klimaschutz (Szenario 5) wird von den Effekten des Klimaschutzes dominiert, sodass sich ein sehr ähnliches Bild wie nur beim Klimaschutz (Szenario 4) ergibt (Abbildung 60).

Im Rahmen dieses Gutachtens wurde nicht untersucht, was die Aufnahme einer oder mehrerer Komponenten zur Abbildung von Extremwetter, Klimaanpassung und Klimaschutz in die Potenzialschätzung bewirken würde und ob dies eine adäquate Methode wäre, mit den Herausforderungen umzugehen, die dieser Wandel für die Potenzialschätzung mit sich bringt. Während (zusätzliche) Extremwetterereignisse negativ auf das Produktionspotenzial wirken und Anpassung dies abmildern kann, ist die Wirkung des Klimaschutzes stärker vom verwendeten Modelltyp und dem konkreten Szenario abhängig. Die Verknüpfung von Klimawandel und Klimaschutz in einem Indikator erscheint auf dieser Grundlage eher nicht zielführend. Die Frage der Aufnahme einer oder mehrerer Klimakomponenten in die Potenzialschätzung kann auf dieser Basis aber nicht beantwortet werden und bleibt Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten.

Abbildung 60: Wirkung der quantifizierbaren Effekte von Extremwetterereignissen, der vereinfacht abgeschätzten Anpassung und des Klimaschutzes (Scen5_KS) auf die Wachstumszerlegung gegenüber der Referenz (Scen1) (in %)



Quelle: PANTA RHEI, eigene Berechnungen.

5 Erkenntnisse und Ausblick

Diese Studie untersucht die möglichen gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimaschutzes; gleichzeitig leistet sie einen Beitrag zur integrierten Betrachtung von Klimaschutz sowie von quantifizierbaren Effekten von zusätzlichen Extremwetterereignissen und der Anpassung daran. Zum einen wird der Fokus auf die bisher geleisteten Investitionen zu Klimaschutz und Klimaanpassung gelegt. Zum anderen wird die ökonomische Wirkung von Klimaschutz sowie von Klimaanpassungsmaßnahmen als Reaktion auf zusätzliche Extremwetterereignisse abgeschätzt. Zuletzt wird ein Bezug zum Produktionspotenzial hergestellt. Die Quantifizierungen konzentrieren sich dabei auf im Rahmen des Studiendesigns abgebildete Effekte. Die Studie stellt keine umfassende Prognose weder der gesamten Klimawandelkosten noch der gesamten notwendigen Klimawandelanpassungsinvestitionen Deutschlands dar.

Gesamtwirtschaftliche Ausgaben für Klimaschutz und Klimaanpassung

Es gibt keine allgemein gültige Definition des Begriffs Klimaschutzinvestition. Es bestehen unterschiedliche Begriffskonzepte, die sich insbesondere in der Perspektive und dem Erfassungszweck unterscheiden (IW 2022). Die ermittelten Zahlen in dieser Studie entsprechen in der Größenordnung nur teilweise Zahlen der amtlichen Statistik. Die amtliche Statistik stellt derzeit keine Daten bereit, die aus unserer Sicht die gesamtwirtschaftliche Dimension von Klimaschutzinvestitionen und -ausgaben umfassend beschreiben, um diese Konzepte in makroökonomischen Analysen angemessen abbilden zu können.

Als Klimaschutzinvestitionen werden in diesem Gutachten zum einen Investitionen aufgefasst, welche ohne Klimaschutz nicht getätigt würden. Das sind im Bereich der Industrie beispielweise Mehrinvestitionen gegenüber konventionellen Technologien (Kostenunterschied zwischen „grüner“ und „brauner“ Technologie). Zum anderen wird im Bereich Energieerzeugung die volle Investitionssumme (etwa des Windrades) angesetzt. Berechnet werden die zukünftigen Klimaschutzinvestitionen auf Grundlage von Mengengerüsten aus der Modellierung des Klimaschutzszenarios „Roadmap Energieeffizienz“ mit Bottom-up-Modellen. Diese Mengengerüste werden mit technologiespezifischen Kosten monetarisiert. Bereits im Referenzszenario, das den Politikstand zu Beginn des Jahres 2020 widerspiegelt, werden bis zum Jahr 2045 Klimaschutzinvestitionen von jährlich 80 bis fast 90 Mrd. Euro getätigt. Im Klimaschutzszenario ergeben sich im Zeitraum bis 2035 jährliche Klimaschutzinvestitionen von rund 150 Mrd. Euro, nach 2035 belaufen sich die mittleren, jährlichen Klimaschutzinvestitionen auf 100 bis 120 Mrd. Euro. Im Vergleich zum Referenzszenario entspricht dies zusätzlichen Klimaschutzinvestitionen in einer Größenordnung von 70 Mrd. Euro jährlich bis 2035 und 20 bis 30 Mrd. Euro jährlich zwischen 2035 und 2045. Hohe Klimaschutzinvestitionen ergeben sich insbesondere in den Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft inkl. Energieinfrastruktur. Annahmen über künftige Entwicklungen beeinflussen die Ergebnisse. Bezüglich der Entwicklung der zukünftigen Preise von Technologien und Energiepreisen bestehen teilweise Unsicherheiten.

Auch im Bereich der Klimafolgenanpassung bestehen noch zahlreiche Herausforderungen, die die Abschätzung der Kosten bzw. Investitionsnotwendigkeiten für eine

‚erfolgreiche‘ Anpassung erschweren. Die Klimaanpassung als Querschnittsbranche wird als solches nicht in offiziellen Statistiken ausgewiesen. Die in der Vergangenheit getätigten Investitionen in die Klimaanpassung liegen lediglich bruchstückhaft in Einzeldaten vor. Daher wurden die Investitionen mit einem Bezug zur Klimaanpassung im Referenzszenario in einem Bottom-up-Ansatz auf Basis verschiedenster Quellen ermittelt. Dies stellt jedoch keine umfassende Prognose der gesamten erforderlichen Anpassungsinvestitionen dar, sondern enthält vereinfacht abgeschätzte Investitionen zur Anpassung an die Folgen von Extremwetterereignissen. Zur Bestimmung der Investitionen in die Anpassung in den Szenarien mit Effekten von fortschreitenden bzw. verstärkten Extremwetterereignissen war zudem eine quantitative Zieldefinition einer ‚erfolgreichen‘ Klimafolgenanpassung notwendig. Für Deutschland sind derzeit noch keine quantifizierbaren Ziele für die Klimaanpassung festgelegt. Daher wurde im Anpassungsszenario auf eine eigene Zielformulierung zurückgegriffen, welche die Höhe der Anpassungsinvestitionen ermittelt, die bei einer Durchschnittsbetrachtung für eine vollständige Vermeidung der inländisch entstehenden einfach abgeschätzten durch Extremwetter bedingten Schäden (im Modell) notwendig wären. Es muss hierzu angemerkt werden, dass es sich um einen vereinfachten Ansatz handelt, der aufgrund fehlender Informationen über Schadenskostenvermeidungskurven gewählt werden musste. Ausgehend von der zu erwartenden Höhe an Schäden wurden die notwendigen Investitionen auf Basis von Kosten-Nutzen-Verhältnissen abgeschätzt. Die Kosten-Nutzen-Verhältnisse mussten dabei jedoch als konstant angenommen werden. Die derzeit getätigten Ausgaben für die Klimaanpassung dürften demzufolge nach dem aktuellen Politikstand in Deutschland bei 5 bis 6 Mrd. Euro jährlich liegen.

Wirkungskanäle und Interaktionen

Der Forschungsstand über die Wirkungskanäle, über die der Klimawandel, die Anpassung an den Klimawandel und der Klimaschutz auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung und die Struktur der Volkswirtschaft wirken, ist aktuell unterschiedlich gut.

Der Klimawandel wirkt in Deutschland nach aktuellem Forschungsstand vor allem auf die Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei, den Verkehr, die Gebäude und die Infrastruktur generell sowie die menschliche Gesundheit, wobei Dürre, Hitze sowie Starkregen und Hochwasser die größte Rolle spielen. Auch im Ausland treten Effekte auf, die die deutsche Volkswirtschaft treffen. Sie sind nur vereinfachend und ohne Anspruch auf Vollständigkeit betrachtet worden. Wesentliche Auswirkungen des Klimawandels wie etwa die Überschreitung von Klimakippunkten, das Kollabieren von Ökosystemen, globale Migrationsbewegungen oder Erkenntnisse neuer klimaökonomischer Studien, welche zu sehr hohen Kosten für die deutsche Volkswirtschaft führen werden, können dagegen nicht im Rahmen des vorliegenden Studiendesigns berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Studiendesigns werden aus der Literatur Parameter abgeleitet, die für die Modellierung der erwarteten ökonomischen Wirkungen Verwendung finden können. Auf dieser Grundlage lassen sich Abschätzungen zu den Wirkungen quantifizierbarer Effekte von Extremwetterereignissen für Deutschland vornehmen. Die modellierten Einflüsse von Extremwetterereignissen wirken überwiegend negativ sowohl auf die Wirtschaftsleistung als auch auf das Produktionspotenzial ein. Niedrigere Arbeitsproduktivität,

höhere Produktionskosten, geringere Produktionskapazitäten und niedrigere Erträge schränken das Produktionspotenzial bei fast allen Klimarisiken ein.

Die Auswertung der Literatur zur Klimaanpassung zeigt, dass häufig der Begriff Klimaanpassung noch mit der reinen Reduktion von Schäden in Verbindung gebracht wird und sich die Studien vor allem zwei grundlegend unterschiedlichen Perspektiven zuordnen lassen. Zum einen wird in der Literatur vor allem der Kosten-Nutzen-Effekt von spezifischen Einzelmaßnahmen untersucht. Eine Bewertung von mehreren Maßnahmen als Maßnahmenpaket auf nationaler Ebene und ihre Einordnung hinsichtlich volkswirtschaftlicher Effekte findet im Forschungsbereich der Kosten-Nutzen-Analysen eher selten statt. Dies liegt insbesondere daran, dass Klimawandelfolgen lokal sehr unterschiedlich ausfallen können und daher regional zugeschnittener Anpassungsmaßnahmen bedürfen. Daher ist die Bewertung der ökonomischen Wirkungen von Klimaanpassungsinvestitionen sowie die Einordnung der Schadensvermeidung durch Anpassungsmaßnahmen im jeweiligen Kontext von Angebot, Nachfrage, Einkommen oder Produktionspotenzial bisher kaum Gegenstand dieser (Kosten-Nutzen-basierten) Einzelstudien. Zum anderen sind die ausgewerteten Studien modellbasiert und aus der ex-ante-Perspektive formuliert als kontrafaktische Szenarien für ein konkretes Klimawandelereignis für eine bestimmte Region bzw. einen bestimmten Regionstyp unter Verwendung eines spezifischen Modells mit Annahmen zu Stärke des Klimawandels und dem untersuchten Zeitraum. Dies erschwert die Übertragbarkeit spezifischer Modellergebnisse bestimmter regional getätigter Einzelmaßnahmen auf eine deutschlandweit allgemeingültige Ebene, d.h. es lassen sich nur selten bzw. schwer allgemeingültige Effekte von Klimaanpassungsmaßnahmen im Sinne von Kosten-Nutzen-Maßnahmen aus diesem Literaturfeld ableiten.

Der Fokus vereinzelter weiterer Modell-Untersuchungen liegt auf der Untersuchung der Klimawandel- bzw. der Anpassungsimplicationen auf gesamtsstaatlicher oder gesamtwirtschaftlicher Ebene. Bedeutendste Metrik sind hier die Einflüsse der Anpassungsmaßnahmen auf das BIP. Nur selten werden die Anpassungskosten oder -nutzen für private Haushalte bestimmt. Hier besteht, auch vor dem Hintergrund einer höchst individuellen Entscheidungsfindung zur Anpassung an die Klimawandelfolgen, weiterer Forschungsbedarf.

Die ökonomischen Effekte des Klimaschutzes sind vergleichsweise gut erforscht. In der Literatur werden verschiedene Wirkungskanäle von Klimaschutzmaßnahmen aufgeführt. Weitgehende Einigkeit besteht darin, dass höhere CO₂-Preise und zusätzliche Investitionen in die Energiewende notwendig sind, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen. Klimaschutz im Energiebereich zielt vor allem auf den Ausbau CO₂-freier Energieträger und die Steigerung der Energieeffizienz ab, wobei sich die Transmissionsmechanismen kostenseitig unterscheiden. Sich einzelwirtschaftlich lohnende Investitionen in Energieeffizienz senken dauerhaft Kosten und wirken in jedem Fall gesamtwirtschaftlich positiv. Bei der Substitution von Energieträgern ist dagegen entscheidend für einen positiven gesamtwirtschaftlichen Effekt in der längeren Frist, dass die Kosten einschließlich CO₂-Kosten langfristig niedriger sind als die der ersetzten oder alternativen fossilen Technologien. Einige Klimaschutzmaßnahmen wie der Kauf von Elektrofahrzeugen oder Wärmepumpen ersetzen einerseits fossile Energieträger und sind zugleich deutlich energieeffizienter. Klimaschutz betrifft ökonomisch die wichtigen Emissionssektoren,

d. h. die Energiewirtschaft, die energieintensive Industrie, den Verkehr und den Gebäudesektor, aber auch die Wirtschaftsbereiche, die die neuen Klimaschutzgüter herstellen.

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte derartiger Klimaschutzmaßnahmen sind in ihrer Richtung nicht eindeutig und von vielen Faktoren abhängig. Deshalb werden sie in der Regel in Modellberechnungen ermittelt. Stärker angebotsorientierte Ansätze kommen dabei zu etwas negativeren Effekten des Klimaschutzes als nachfrageorientierte. Dabei spielt neben der Instrumentierung die Frage eine Rolle, ob höhere Investitionsquoten möglich sind, sodass die Investitionen in ein dekarbonisiertes Energiesystem zusätzlich getätigt werden können, oder ob sie andere Investitionen (teilweise oder ganz) verdrängen (Crowding-out-Effekt). Die Annahme hierüber kann von entscheidender Bedeutung für die Höhe und das Vorzeichen der wirtschaftlichen Effekte sein. Klimaschutzmaßnahmen können zu „stranded assets“ führen, also den produktiven Kapitalstock reduzieren, wenn Maschinen, Anlagen oder Gebäude, die mit fossilen Energien betrieben werden, vorzeitig entwertet werden. Zudem gibt es Unterschiede bei den Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen zwischen Branchen: Energieintensive Wirtschaftszweige sind abhängiger von Energiepreisen, sodass sie von höheren CO₂-Preisen und dadurch ausgelöst höheren Investitionen in das Energiesystem stärker und direkter betroffen sind. Folglich sind Aspekte des Strukturwandels relevant für die Analyse. Schließlich ist die Bedeutung des internationalen Zusammenhangs zu beachten, der in nationalen Studien meist ausgeblendet wird, während in internationalen Studien Klimaschutzpolitik und Struktur der Volkswirtschaft oft (zu) stark vereinfacht modelliert werden. Internationale Effekte sind vor allem Wettbewerbseffekte, wenn die CO₂-Kosten in einem Land im Vergleich zunehmen, und Möglichkeiten zum Export von Klimaschutzgütern entstehen, wenn andere Länder verstärkten Klimaschutz betreiben. Außerdem sinken die Kosten der Klimaschutztechnologien mit dem globalen Ausbau. Empirische Studien, die tatsächlich umgesetzte CO₂-Bepreisungen untersuchen, zeigen leicht positive gesamtwirtschaftliche Effekte.

Mit dem Klimaschutz und der Anpassung an den Klimawandel stehen zwei Strategien zur Minderung des Klimawandels und seiner Wirkungen zur Verfügung, die in der umweltökonomischen Debatte lange kontrovers diskutiert wurden. So gab es die Argumentation, dass sich Anpassungsmaßnahmen für ein Land wegen des Charakters von Klimaschutz als globalem öffentlichem Gut viel mehr lohnen würden und Klimaschutz besser in die Zukunft verschoben werden sollte, wenn die Technologien dann günstiger seien. Das Abkommen von Paris kann dagegen dahingehend interpretiert werden, dass internationaler Klimaschutz umfassend und so schnell wie möglich stattfinden müsse, damit Anpassung zukünftig noch gelingen könne. Beide Strategien seien gleichermaßen wichtig und gleichzeitig umzusetzen. Dabei ist zu bedenken, dass wichtige Klimawandelfolgen gerade auch international nur begrenzt oder gar nicht durch Anpassung vermieden werden können.

Klimawandel, Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz werden in der Literatur bisher meist getrennt analysiert, wenn Wirkungskanäle und Interaktionen betrachtet werden. Die unterschiedlichen Skalenebenen, nämlich zeitlich, räumlich und bezüglich der betroffenen Sektoren, auf denen Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel stattfinden, dürften der Grund dafür sein, dass sich gesamtwirtschaftliche Analysen mit sektoraler Differenzierung bisher nicht mit allen drei Effekten gleichzeitig auseinandergesetzt

haben. Beim Vergleich der von Klimawandel, Anpassung und Klimaschutz stark betroffenen Wirtschaftsbereiche zeigt sich, dass die Überschneidungen begrenzt sind. Angesichts der noch wenig untersuchten Zusammenhänge zwischen Klimawandel, Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz auf nationaler und regionaler Ebene ist die Bestimmung eines optimalen Mix zwischen Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen auf nationaler Ebene komplex und stark von Annahmen und Zielformulierung abhängig.

Quantifizierbare Effekte von Extremwetterereignissen, der vereinfacht abgeschätzten Anpassung daran und des Klimaschutzes auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung, die Wertschöpfungsstrukturen und das Produktionspotenzial

Das Modell PANTA RHEI ist ein makroökonomisches Modell der deutschen Volkswirtschaft, in dem der langfristige intersektorale Strukturwandel in der wirtschaftlichen Entwicklung mithilfe von Input-Output-Tabellen auf der Ebene von Wirtschaftszweigen abgebildet wird. Grundsätzlich wird dabei angenommen, dass Zusammenhänge und Verhaltensweisen der Vergangenheit auch in Zukunft gelten, Einflussfaktoren zukünftig also ähnlich wirken wie in der Vergangenheit. Für die Abbildung der intrasektoralen Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft müssen weitergehende Annahmen getroffen werden. Für die quantifizierbaren Effekte von (zusätzlichen) Extremwetterereignissen werden die Annahmen direkt im Modell hinterlegt. Für die vereinfacht abgeschätzte Anpassung daran werden Maßnahmen der deutschen Anpassungsstrategie und weiterer Quellen in Modellparameter übersetzt. Beim Klimaschutz werden die direkten Wirkungen des Klimaschutzes auf benötigte Investitionen, Energiemengen und -preise in Bottom-up-Modellen auf Basis der Roadmap Energieeffizienz ermittelt und anschließend in PANTA RHEI eingestellt.

Um die Effekte von Extremwetterereignissen, Anpassung daran und Klimaschutz auf die wirtschaftlichen Strukturen in Deutschland abzuschätzen, werden mit dem Modell fünf Haupt-Szenarien gerechnet: ein Referenzszenario ohne zusätzliche Extremwetterereignisse, Anpassung daran und Klimaschutz sowie drei Szenarien, die die quantifizierbaren Folgen von Extremwetterereignissen, von vereinfacht abgeschätzter Anpassung daran und zusätzlichen Extremwetterereignissen sowie von Klimaschutz zunächst jeweils einzeln und abschließend in einem weiteren Szenario gemeinsam betrachten. Außerdem werden drei vereinfachte Sensitivitäten gerechnet, die von verstärkten Extremwetterereignissen mit verstärkter Anpassung ausgehen sowie die für die wirtschaftlichen Wirkungen des Klimaschutzes wichtige Annahme der Zusätzlichkeit der Klimaschutzinvestitionen bewerten.

Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Literaturanalyse werden die Effekte zusätzlicher Extremwetterereignisse für die folgenden für Deutschland zentralen Klimawirkungen quantifiziert: Ertragsausfälle in der Landwirtschaft, Nutzfunktion Holzertrag der Wald- und Forstwirtschaft, Fischerei, Grundwasserstand und Grundwasserqualität in der Wasserwirtschaft, Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen bei Niedrigwasser, Bedingungen auf internationalen Absatzmärkten (Industrie und Gewerbe), Schäden an Gebäuden durch Starkregen und Hochwasser sowie Auswirkungen auf das Gesundheitssystem. Die Auswahl der modellierten Effekte beschränkt sich auf monetarisierbare

Größen, die sich im Modell abbilden lassen. Dadurch stellen die Ergebnisse eine konservative Untergrenze dar.

Die quantifizierbaren Kosten von Extremwetterereignissen lassen sich durch Anpassungen an die Klimawirkungen reduzieren. Anpassungsmaßnahmen bilden dabei die Grundlage für die im Szenario Extremwetter und Anpassung umgesetzten Anpassungen an den Klimawandel. Die Maßnahmen wurden den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie zugeordnet und mit abgeschätzten Umsetzungshorizonten zusammengefasst. Zur Darstellung der Wirkungen der anvisierten Anpassungsmaßnahmen in der Szenarioanalyse werden diese ebenfalls in Parameter übersetzt. Dazu wurden mehrere Annahmen getroffen: Die Klimaschäden treten bis zur vollständigen Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen unverändert ein, d. h. bis zur Umsetzung entstehen Schäden wie im Szenario Extremwetter ermittelt. Erst mit der vollständigen Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen wirken die Anpassungen im Inland vollumfänglich. Die Folgen von inländischen Extremwetterereignissen werden durch die Maßnahmen so weit eingedämmt, dass die monetären Kosten, die ohne Anpassungsmaßnahmen durch die Klimawandelfolgen entstehen würden, vollständig aufgefangen werden können. Es werden nur Anpassungsmaßnahmen im Inland umgesetzt. Insgesamt handelt es sich um eine Bestimmung von ausgewählten Ausgaben für die Anpassung an Extremwetterereignisse und nicht um eine vollumfängliche Bestimmung der tatsächlich real für Deutschland anfallenden Anpassungskosten. Ebenso ist zu erwarten, dass wesentliche im Rahmen der Studie nicht abgebildete Klimawandelkosten wie etwa die Überschreitung von Klimakipppunkten, globale Migrationsströme, die starke Reduktion globaler und europäischer Einkommen oder der irreversible Kollaps von Ökosystemen nicht durch lokal in Deutschland vorgenommene Anpassungsinvestitionen gemindert werden können.

Die Modellierung des Klimaschutzes wird insbesondere über zusätzliche Investitionen in entsprechende Maßnahmen abgebildet, die als Differenz zur Referenzentwicklung in den Bottom-up-Modellen ermittelt und in PANTA RHEI eingestellt werden. Diese werden zunächst als vollständig zusätzlich zu den Ohnehin-Investitionen angenommen, d. h., dass es keine Restriktionen über den Kapitalmarkt gibt. Vorzeitigen Abschreibungen des Kapitalbestandes werden nicht vorgenommen. Der Investitionsimpuls verursacht eine zusätzliche Nachfrage, um die Klimaschutzmaßnahme umzusetzen. Es gibt verschiedene Gründe für diese Annahme, die gleichwohl für alle Klimaschutzmaßnahmen gerade in Jahren mit hohen Klimaschutzinvestitionen optimistisch ist. Die darauf beruhenden Ergebnisse stellen somit einen oberen Rand dar. Sie dürfen auch nicht zum falschen Schluss führen, dass die Effekte von Klimaschutz immer besser werden, je höher die Investitionen ausfallen, weil damit die Gefahr von Crowding-out und Fehlinvestitionen steigt.

Für das Klimaschutzszenario sind neben höheren Investitionen auch höhere CO₂-Preise notwendig, welche diese die Höhe der Energiepreise beeinflussen und damit zu Kosten- und Preissteigerungen, insbesondere in energieintensiven Wirtschaftsbereichen, führen. Höhere Energiepreise wirken sich zunächst negativ auf die betroffenen Wirtschaftsbereiche und auf die privaten Haushalte aus, d. h., Produktion bzw. Konsum liegen dadurch c. p. niedriger als in der Referenz. Die höheren Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung fließen in den Staatshaushalt und werden nicht zurückgegeben. Sie dienen aber zur

Finanzierung der höheren staatlichen Investitionen, wobei die Höhe der Differenzinvestitionen nicht von den CO₂-Einnahmen abhängt.

Ergebnisse der Szenariorechnungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die zusätzlich betrachteten Extremwetterereignisse eindeutig mindernd auf die Wirtschaftsleistung wirken und die Schäden mit Voranschreiten des Klimawandels immer größer werden. Hierbei handelt es sich um konservative Untergrenzen, da nur monetär bewertbare Effekte berücksichtigt werden können, die sich zusätzlich zu den schon heute anfallenden Kosten von Extremwetterereignissen ergeben. Wirkungskanäle über das Ausland sind unsicher und könnten in der Modellierung unterschätzt werden. In einem kontrafaktischen Vergleich ohne bereits bestehenden Klimawandel und unter Berücksichtigung nicht bzw. schwer monetär bewertbarer Schäden wie z.B. dem Verlust an Artenvielfalt, Todesfällen, psychischer Langzeitwirkungen, dem Verlust an Kulturgütern etc., dürften die Kosten des Klimawandels um ein Vielfaches höher liegen.

Durch die vorsichtig abgeschätzten Anpassungsmaßnahmen können die Verluste durch Extremwetterereignisse eingedämmt werden. Die begrenzte Wirkung der Anpassungsmaßnahmen ist darauf zurückzuführen, dass die Folgen von Extremwetterereignissen in anderen Teilen der Welt (insbesondere dem globalen Süden) bereits deutlich stärker zu spüren sind und die internationalen Schäden und damit verbundenen Kosten über den Handel ihre Wirkung indirekt im Inland entfalten. Die im Inland getätigten Anpassungsmaßnahmen haben darauf keinen Einfluss. In der Szenariomodellierung wurden per Annahme keine Bemühungen in internationale Anpassungsinvestitionen berücksichtigt.

Klimaschutz wirkt im makroökonomischen Modell vor allem über zusätzliche Investitionen in Ausrüstungen und Bauten sowie Konsumausgaben positiv auf die Gesamtwirtschaft. Höhere CO₂-Preise und Strompreise wirken zwar für sich zunächst gesamtwirtschaftlich negativ. Reduzierte Energiekosten durch höhere Energieeffizienz und den Umstieg auf heimische Energieträger sind jedoch wiederum positiv für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung. Aus unserem nachfrageorientierten Modell, das Restriktionen auf dem Kapitalmarkt nicht berücksichtigt, resultiert ein positiver Effekt der Klimaschutzmaßnahmen auf das BIP, der im Jahr 2030 bei 2,3 % und 2045 bei 0,8 % gegenüber dem Referenzszenario liegt. Das ist zumindest für 2030 auch verglichen mit ähnlichen Modellen (UBA 2024a) ein hoher Wert und erklärt sich aus dem recht optimistischen Klimaschutzszenario, in dem die Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden, ohne dass die Instrumentierung, einzelwirtschaftliche Vorteilhaftigkeit und Finanzierung immer klar sind. Zusätzliche Abschreibungen und Abgänge werden nicht unterstellt.

Infolge dieser höheren Wirtschaftsleistung liegen die verfügbaren Einkommen der privaten Haushalte und damit ihr Konsum höher. Im privaten Konsum sind auch die Ausgaben der privaten Haushalte für Heizungen enthalten, die gegen Ende des Projektionszeitraums im Klimaschutzszenario zunehmen im Vergleich zum Referenzszenario. Die Außenhandelsbilanz verschlechtert sich geringfügig: Das aufgrund der CO₂-Preispfade und höheren Strompreise höhere Preisniveau im Klimaschutzszenario wirkt sich senkend auf die Exporte und erhöhend auf die Importe aus, während letztere außerdem durch die zusätzliche Nachfrage angehoben werden. Die Ergebnisse für den Finanzierungssaldo

des Staates sind unter den getroffenen Annahmen und wegen der höheren Wirtschaftsleistung im Klimaschutzszenario positiv.

Wird die Annahme der Zusätzlichkeit der Investitionen in der Sensitivitätsrechnung aufgegeben, sind die gesamtwirtschaftlichen Effekte kurz- und mittelfristig schlechter als bei Annahme zusätzlicher Investitionen, bleiben im Vergleich zur Referenz aber positiv. Langfristig ist der Unterschied aber gering. Dann ist die deutsche Volkswirtschaft durch die Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz und die erfolgte Transformation hin zu stärker heimisch produzierten Energieträgern gesamtwirtschaftlich besser aufgestellt als in der Referenz, denn die Energieimporte und Energiekosten sind niedriger als in der Referenz. Im Vergleich zum Klimaschutzszenario stützt die Annahme von Crowding-in in den letzten Jahren die Investitionsentwicklung und damit auch den positiven BIP-Effekt. Die Annahme zur Zusätzlichkeit spielt also vor allem für die kurz- und mittelfristigen gesamtwirtschaftlichen Effekte des Klimaschutzes eine Rolle.

Das Szenario ist darüber hinaus optimistisch in verschiedener Hinsicht: Die Klimaschutzmaßnahmen werden im Szenario von den Investoren umgesetzt. Die gesamten Klimaschutzinvestitionen, also inklusive der in der Referenz getätigten Ausgaben, sind dabei im Vergleich zu den Gesamtinvestitionen hoch. Die Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen ist im Szenario nicht durch konkrete Finanzierung hinterlegt, ohne dass die CO₂-Preise langfristig sehr stark steigen. Damit verbunden ist die Frage der konkreten Finanzierung etwa auch durch staatliche Förderung, die durch die staatliche Budgetrestriktion stärker begrenzt ist, als dies bei Erstellung des Roadmap-Szenarios zu erwarten war. Die Zusätzlichkeit von Investitionen ist fraglich, wenn Klimaschutz durch höhere Staatsausgaben angereizt werden muss und an anderer Stelle Staatsausgaben eingeschränkt werden müssten. In der Referenz angenommene Wachstumsraten des BIP in den Jahren 2023, 2024 und absehbar 2025 werden nicht erreicht, was die Finanzierung und reibungslose Umsetzung des Klimaschutzes auch erschwert. Die Klimaschutzmaßnahmen finden im Szenario zeitlich so statt, dass keine zusätzlichen Abschreibungen und Abgänge bei vorzeitiger Stilllegung von Anlagen notwendig sind. Dies setzt voraus, dass der technische Fortschritt dem im Szenario angenommenen Profil folgt. Schließlich wird im Klimaschutzszenario angenommen, dass im Ausland vergleichbare Maßnahmen zum Klimaschutz getroffen werden wie in Deutschland und damit keine Kostennachteile verbunden oder Handelsanteile gefährdet sind. Sollten einzelne dieser Punkte weniger positiv ausfallen als im Klimaschutzszenario angenommen, würden auch die gesamtwirtschaftlichen Effekte eines alternativen Szenarienvergleichs weniger positiv sein.

Die integrierte Betrachtung ergibt sich aus der Addition der Einzeleffekte für die quantifizierbaren Wirkungen von Extremwetterereignissen, die vereinfacht abgeschätzte Anpassung und den Klimaschutz. Ein direkter 1:1 Vergleich ist dabei nicht ohne weiteres möglich, da der Klimaschutz auf die Erreichung der Klimaziele ausgerichtet ist, wohingegen Effekte des zusätzlichen Extremwetterereignisse und Anpassung daran nur Teilaspekte von Klimawandel und Anpassung abbilden. Während die Extremwetterereignisse gesamtwirtschaftlich negativ wirken und Anpassungsmaßnahmen diese Effekte zum Teil ausgleichen, wirkt der Klimaschutz bei Annahme der Zusätzlichkeit der Investitionen und auch ohne diese Annahme mittel- und längerfristig gesamtwirtschaftlich positiv.

Die Sensitivitäten zu Extremwetterereignissen und Anpassung zeigen, dass eine angenommene Verdopplung der Input-Parameter des Extremwetterszenarios die gesamtwirtschaftliche Minderung gegenüber der Referenz mehr als verdoppelt. Höhere Anpassungsmaßnahmen könnten dann die stärkeren Effekte der Extremwetterereignisse reduzieren.

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte schlagen sich bei Zerlegung der Komponenten zum Potenzialwachstum in den Szenarien zu Extremwetterereignissen, zur Anpassung und zum Klimaschutz vor allem in der Stundenproduktivität - und damit in der Totalen Faktorproduktivität - nieder, die stärker reagiert als der Arbeitseinsatz. Extremwetterereignisse wirken auf die Arbeitsproduktivität in stark betroffenen Branchen negativ. Höheres BIP und höhere Reallöhne sowie Verschiebungen hin zu Branchen mit hoher Arbeitsproduktivität sind Gründe für die höhere Stundenproduktivität im Klimaschutzszenario. Der Arbeitseinsatz ändert sich in den Szenarien nur wenig. Der Kapitalbeitrag wird durch Extremwetterereignisse leicht negativ beeinflusst, was durch Anpassung ein wenig reduziert werden kann. Klimaschutz kann den Kapitalbeitrag zunächst deutlich erhöhen, wenn Zusätzlichkeit der Klimaschutzinvestitionen angenommen wird. Die Gesamteffekte auf das Produktionspotenzial werden in den Modellierungsergebnissen durch den Klimaschutz dominiert, was durch die vereinfachte Szenarienbildung mit bestimmt wird und keine Rückschlüsse auf einen Gesamtvergleich aller Effekte zulässt.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass im gewählten Modellrahmen Extremwetterereignisse die gesamtwirtschaftliche Entwicklung negativ beeinflussen, wobei die Effekte durch vereinfacht abgebildete Anpassungsmaßnahmen reduziert werden können. Dagegen wirkt der Klimaschutz für das konkret abgebildete Klimaschutzszenario und unter den Modellannahmen positiv. Bei Einsatz stärker angebotsorientierte Modelle und bei anderer Ausgestaltung des Klimaschutzes finden sich in der Literatur weniger positive und teils auch negative Effekte von Klimaschutz.

Ausblick

Mit Blick auf die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen des Klimaschutzes legen die Ergebnisse in Verbindung mit der vorgenommenen Literaturrecherche nahe, dass künftige Forschung zu den Effekten des Klimaschutzes den Fokus angesichts der verbindlichen Ziele zur THG-Neutralität in Deutschland und der EU nicht zuletzt auf die Frage lenken sollte, welche Ausgestaltung des Klimaschutzes gesamtwirtschaftlich besser funktioniert als andere. Dabei sind unter anderem die Investitionskalküle der Akteur:innen besser abzubilden. Die noch weitgehend getrennte Betrachtung der Veränderungen auf den Energiemärkten und der Wirkungen der Transformation in der Volkswirtschaft hin zur Klimaneutralität sollten stärker zusammen modelliert und analysiert werden. Das bisherige fossile Energiesystem ist keine Option mehr, da Klimaneutralität damit nicht zu erreichen ist. Daneben sind die Finanzierung und konkrete Instrumentierung der höheren Klimaschutzausgaben wichtige Punkte. Nicht zuletzt stellt sich die Frage, ob und wie der zunehmende Klimawandel den Klimaschutz beeinträchtigen kann und wie dies besser verstanden und erfasst werden kann..

Eine integrierte Betrachtung von Klimaschutz, Klimawandel und Klimawandelanpassung stellt sich aufgrund der dargestellten Limitationen als herausfordernd dar. Die Literaturrecherche zeigt, dass bisher Klimawandel und Anpassung auf der einen Seite und

Klimaschutz auf der anderen Seite mit Blick auf die gesamtwirtschaftlichen Effekte vielfach noch getrennt betrachtet werden. Für eine gemeinsame Betrachtung ist es notwendig, die unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen, auf denen die Effekte auftreten, vergleichbar zu machen. Bei passender Auflösung können Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und zum Klimaschutz auch besser verglichen und aufeinander abgestimmt werden. Wegen der unterschiedlichen Betroffenheit von Branchen bietet sich eine entsprechende Differenzierung an.

Eine fundamentale Herausforderung mit Blick auf die Abschätzung volkswirtschaftlicher Auswirkungen des Klimawandels besteht darin, dass wesentliche Klimawandeleffekte wie etwa das Überschreiten von Klimakipppunkten, globale Migrationsströme, der irreversible Kollaps von Ökosystem und nicht zuletzt die in neuen klimaökonomischen Studien ermittelten sehr hohen ökonomischen Kosten eher in globalen, hoch aggregierten Modellen erfasst werden können, deren Auflösung auf die nationale oder sogar regionale Ebene, auf der Klimawandel konkret sichtbar wirkt und durch Anpassungsmaßnahmen angegangen wird oder dies geplant ist, noch nicht erfolgt ist. Darin besteht ein wesentlicher Forschungsbedarf. Ein weiterer wesentlicher Forschungsbedarf besteht darin, generell das Verständnis der Effekte des Klimawandels auf ökonomisch relevante Zusammenhänge zu verbessern, z.B. indem diese räumlich besser aufgelöst werden. Extremereignisse können durch die Zerstörung des Kapitalstocks die wirtschaftliche Tätigkeit längerfristig beeinträchtigen. Hierzu gibt es verschiedene Forschungsansätze zur Abbildung der Folgen von Katastrophen, die wegen der Individualität der Ereignisse vor großen Herausforderungen stehen. Außerdem gibt es Bereiche wie Gesundheit, wo ökonomische Wirkungen noch nicht immer verstanden werden und das BIP als Messgröße für wirtschaftliche Aktivität an Grenzen stößt. Schließlich sind die internationalen Wirkungskanäle als wichtiger Forschungsgegenstand zu nennen. Klimawandel in anderen Teilen der Welt kann zukünftig Lebensmittel verteuern, Lieferketten unterbrechen oder Migrationsströme auslösen. Angesichts der großen Unsicherheit bietet es sich gerade auch hier an, verschiedene denkbare Zukünfte zu untersuchen und die Analyse nicht auf eine vermeintlich „wahrscheinliche“ Zukunft zu beschränken.

Forschungsbedarf mit Blick auf die Erfassung von Investitionen mit einem Bezug zur Klimaanpassung besteht insbesondere auf Ebene der Kommunen sowie bei den privaten Akteur:innen. Hier liegen noch zahlreiche Wissens- und Erfassungslücken der in der Vergangenheit getätigten Investitionshöhen vor. Eine Bereitstellung der Haushalte der Länder und Kommunen in einem maschinenlesbaren Format würde die Erfassung der Investitionen erleichtern. Gleiches gilt für die Ausweisung der Klimaanpassung als Querschnittsbranche in öffentlichen Statistiken.

Die Frage der Aufnahme einer oder mehrerer Klimakomponenten in die Potenzialschätzung ist im Rahmen der Studie nicht betrachtet worden und bleibt Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten.

Trotz aller Unsicherheiten zeigen die Szenarioergebnisse, dass sich die negativen Folgen von Extremwetterereignissen durch Anpassungsmaßnahmen reduzieren lassen und Klimaschutz unter bestimmten Annahmen gesamtwirtschaftlich positiv wirken kann. Das gemeinschaftliche Vorantreiben und Umsetzen von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen ist daher gemäß dieser Ergebnisse sinnvoll.

6 Anhang

Tabelle 20: Verwendete Abfragekombinationen in der Literaturrecherche zu Wirkungskanälen des Klimawandels

Google scholar	ZBW
Auswirkungen des Klimawandels	Auswirkungen des Klimawandels
Auswirkungen des Klimawandels auf die Wirtschaft	climate change cost germany
Climate change impact on Germany.	climate change costs
Climate change consequences	climate change costs AND Germany
Climate change costs	climate change economic growth
Climate change economic effects	climate change economic growth
climate change economic growth	climate change economic growth Germany
climate change economic growth AND Germany	Climate change economics
climate change economic impact	Climate change economics in Germany
climate change economic impact Germany	Climate change economy
Climate change economy production potential	Climate change effect
Climate change economy/economic	climate change effect AND Germany
Climate change effects	climate change growth
Climate change effects in Germany	climate change growth Germany
climate change growth	Climate change impact
climate change growth AND Germany	climate change impact chain
Climate change impact	Climate change impact chain
Climate change impact chain	climate change impact chain on economy
Climate change impact deutschland	Climate change impact germany
Climate change impact germany	Climate change impact on production potential
Climate change potential output	Climate change impact on production potential Germany
Climate change value added	climate change potential output
Economic effects of climate change	climate change potential output Germany
Economic impact of climate change	climate change value added
economic impact of climate change Germany	Climate change value added
Folgen des Klimawandels auf die Wirtschaft	climate change value added Germany
Gesamtwirtschaftliche Auswirkungen des Klimawandels	Folgen des Klimawandels für die Wirtschaft
Impact of climate change on production potential in Germany	Folgen des Klimawandels auf die Wirtschaft

Klimawandeleffekte auf Deutschland	Klimawandel und Kosten
Klimawandel und gesamtwirtschaftliche Entwicklung	Klimawandel und Wirtschaft
Klimawandel und Wirtschaft	Klimawandel wirtschaftliches Wachstum
Klimawandel und Wirtschaft zusammenhang	Klimawandel auswirkungen
Klimawandel und Wirtschaftswachstum Deutschland	Klimawandel auswirkungen wirtschaft
Klimawandeleffekte	Klimawandel auswirkungen wirtschaft deutschland
Klimawandelkosten	Klimawandel ökonomie Deutschland
Klimawandelkosten Deutschland	Klimawandelfolgen
Kosten des Klimawandels	Klimawandelfolgen Wirtschaft
Kosten des Klimawandels für die Wirtschaft	Kosten des Klimawandels
Makroökonomische folgen klimawandel	Mehrwert durch Klimawandel
Sozialwirtschaftliche Konsequenzen des Klimawandels	Ökonomie des Klimawandels
Wirkungskanäle des Klimawandels	Output des Klimawandels
Wirkungskette des Klimawandels	Output des Klimawandels Deutschland
Wirtschaftliche Auswirkungen des Klimawandels	Potentieller Output des Klimawandels
	Volkswirtschaftliche Folgekosten Klimawandel
	Wirtschaft im Klimawandel
	Wirtschaft im Klimawandel Deutschland
	Wirtschaft und Klimawandel
	Wirtschaft und Klimawandel Deutschland
	Wirtschaftliche Auswirkungen des Klimawandels
	Wirtschaftliche Folgen des Klimawandels

Tabelle 21: Verwendete Abfragekombinationen in der Literaturrecherche zu Wirkungskanälen der Klimaanpassung

Suchstring für die Literaturrecherche zu den ökonomischen Folgen der Anpassung in der ORBIS-Datenbank

```
climate OR {climate change}
AND (adapt*)
AND (*econom*)
AND (channel OR interdependen* OR implication OR implement* OR chain OR effect OR affect OR
system OR response OR reaction OR causal OR relationship OR impact OR influence OR *linkage)
AND (indicator OR price OR increase OR decrease OR positive OR negative OR direct OR indirect OR
supply OR demand OR input OR output OR income OR cost OR wage OR production OR productivity
OR private OR public OR investment OR decision OR save OR consumption OR spend OR revenue
OR growth OR employment OR {gross value added} OR {gross value created} OR welfare OR system
OR capital OR loss OR stock OR model OR scenario OR market OR sector OR activity OR service)
AND SUBJAREA(ECON) OR SUBJAREA(ENVI)
AND INDEXTERMS(climate OR {climate change} AND (adapt*) AND (*econom*))
```

7 Literaturverzeichnis

Ademmer, M., Jannsen, N., Kooths, S. & Mösele, S. (2018): Zum Einfluss des Niedrigwassers auf die Konjunktur. 4. Aufl. Institut für Weltwirtschaft Kiel. Kieler Konjunkturberichte IfW-Box 2018.17, Kiel. <https://www.ifw-kiel.de/de/publikationen/zum-einfluss-des-niedrigwassers-auf-die-konjunktur-27883/>, abgerufen am 22.05.2023.

Ademmer, M., Jannsen, N. & Mösele, S. (2020): Extreme weather events and economic activity: The case of low water levels on the Rhine river. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/216814/1/1697029930.pdf>, abgerufen am 09.06.2023.

Agard, J., Schipper, L., Birkmann, J., Campos, M., Dubeux, C., Nojiri, Y., Olsson, L., Osman-Elasha, B., Alsigs, P., Pelling, M., Prather, M., Rivera-Ferre, M., Ruppel, O., Sallenger, A., Smith, K. & St. Clair, A. (2014): Annex II: Glossary. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge, New York.

Agora Energiewende (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 – Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Hg. v. Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf, abgerufen am 27.01.2023.

Ahmann, L., Banning, M. & Lutz, C. (2022): Modeling rebound effects and counteracting policies for German industries. *Ecological Economics* 197, S. 107432. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107432.

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.

Allen, C. D., Breshears, D. D. & McDowell, N. G. (2015): On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6 (8), art129. DOI: 10.1890/ES15-00203.1.

Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z. & Sanchez, A. (2019): Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management. *Journal of Environmental Management* 239, S. 244–254. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.036.

Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union (2016): Übereinkommen von Paris - Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. <https://eur-lex.europa.eu/content/paris-agreement/paris-agreement.html?locale=de>.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (Hg.) (verschiedene Jahre): Energiebilanz Deutschland.

Balkovič, Juraj, et al. (2015): D7.2. Report on modelling results (including maps) and adaptation options (Update). IMPACT2C. Quantifying projected impacts under 2°C warming. – FP7-ENV.2011.1.1.6-1.

Barange, M., Merino, G., Blanchard, J. L., Scholtens, J., Harle, J., Allison, E. H., Allen, J. I., Holt, J. & Jennings, S. (2014): Impacts of climate change on marine ecosystem production in societies dependent on fisheries. *Nature Clim Change* 4 (3), S. 211–216. DOI: 10.1038/nclimate2119.

Barrage, L. (2023): Fiscal Costs of Climate Change in the United States. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cer-eth/cer-eth-dam/documents/working-papers/wp_23_380.pdf, abgerufen am 09.06.2023.

Batten, S., Sowerbutts, R. & Tanaka, M. (2020): Climate Change: Macroeconomic Impact and Implications for Monetary Policy. DOI: 10.1007/978-3-030-38858-4_2.

Becker, D., Buth, M. & Zebisch, M. (2016): Weiterentwicklung der Wirkungsketten als Grundlage für die DAS-Indikatorenentwicklung. Abschlussbericht. Umweltbundesamt.

Becker, L., Bernardt, F., Bieritz, L., Mönnig, A., Parton, F., Ulrich, P. & Wolter, M. I. (2022): INFORGE in a Pocket. GWS-Kurzmitteilung 2022/02, Osnabrück. <https://www.gws-os.com/de/publikationen/gws-kurzmitteilungen/detail/inforge-in-a-pocket>, abgerufen am 27.09.2023.

Bender, S., Groth, M., Seipold, P. & Gehrke, J.-M. (2022): KLIMASCHUTZ UND ANPASSUNG AN DIE FOLGEN DES KLIMAWANDELS – SYNERGIEN UND ZIELKONFLIKTE IM RAHMEN KOMMUNALER KONZEPTE UND STRATEGIEN.

Bender, S., Groth, M. & Viktor, E. (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Grundwassernutzung – Betroffenheiten, Handlungsbedarfe und Lösungsansätze. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (Grundwasser)* 26 (1), S. 61–72. DOI: 10.1007/s00767-020-00465-9.

Bernardt, F., Rausch-Berhie, F. & Wolter, M. I. (2024): Auswirkungen von Klimaanpassung auf den Arbeitsmarkt – eine Modellierung des zukünftigen maßnahmeninduzierten Arbeitskräftebedarfs. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 12/2024. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auswirkungen-von-klimaanpassung-auf-den>, abgerufen am 28.03.2024.

Bhattacharyaet, A., Songwe, V., Soubeyran, E. & Stern, N. (2024): Raising ambition and accelerating delivery of climate finance – Third report of the Independent High-Level Expert Group on Climate Finance. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science, London. https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2024/11/Raising-ambition-and-accelerating-delivery-of-climate-finance_Third-IHLEG-report.pdf.

Bildungswiki Klimawandel (2024): Klimaszenarien. <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien>, zuletzt aktualisiert am 11.07.2024.

BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.

- Bobb, J. F., Obermeyer, Z., Wang, Y. & Dominici, F. (2014): Cause-Specific Risk of Hospital Admission Related to Extreme Heat in Older Adults – Original Investigation. *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.
- Bönke, T., Dany-Knedlik, G. & Röger, W. (2023): Erfüllung der Klimaziele kann nur bei richtiger Kombination der Maßnahmen Wachstumsimpulse geben. DOI: 10.18723/diw_wb:2023-34-1.
- Bosello, F., Standardi, G., Parado, R., Dasgupta, S., Guastella, G., Rizzati, M., Pareglio, S., Schleyen, J., Boere, E., Batka, M., Valin, H., Bodirsky, B., Lincke, D., Tigge-loven, T. & Ginkel, K. v. (2020): D2.7. Macroeconomic, spatially-resolved impact assessment – Deliverable of the H2020 COACCH project.
- Boston Consulting Group (BCG) (2021): Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft – Gutachten im Auftrag des BDI – Bundesverband der Industrie.
- Brand, S. & Raffer, C. (2023): Kommunale Klimainvestitionen im Spannungsfeld zwischen steigenden Bedarfen und begrenzten Ressourcen. Hg. v. KfW Research. Fokus Volkswirtschaft 427.
- 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>, abgerufen am 15.06.2023. 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, abgerufen am 26.10.2023.
- Bundesbank (2022): Climate change and climate policy – Analytical requirements and options from a central bank perspective. Monthly Report 74 (1), S. 33–61.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2015): Regionale Reichweite der ökonomischen Effekte der Städtebauförderung.
- Bundesministerium der Finanzen (2010): Klimapolitik zwischen Emissionsvermeidung und Anpassung – Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium der Finanzen, Berlin.

Bundesministerium der Finanzen (2023): Bundeshaushalt digital. <https://www.bundeshaushalt.de/DE/Bundeshaushalt-digital/bundeshaushalt-digital.html>.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2023): Entwurf eines Bundes-Klimaanpassungsgesetzes (KAnG).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2015): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI - Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. Unter Mitarbeit von Deutscher Wetterdienst, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Berlin. https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/abschlussbericht.pdf;jsessionid=165DB302FE17B3335F21B35D55F22D88.live21301?__blob=publicationFile, abgerufen am 22.05.2023.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMIV) (Hg.) (2015): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Service/Downloads/Publikationen/abschlussbericht.pdf;jsessionid=165DB302FE17B3335F21B35D55F22D88.live21301?__blob=publicationFile, abgerufen am 22.05.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023a): Energieeffizienz in Zahlen – Entwicklungen und Trends in Deutschland 2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023b): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2022. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) & Bundesministerium der Finanzen (BMF) (Hg.) (2024): Gesamtwirtschaftliches Produktionspotenzial und Konjunkturkomponenten – Datengrundlagen und Ergebnisse der Schätzungen der Bundesregierung. Stand: Frühjahrsprojektion der Bundesregierung vom 24. April 2024. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesamtwirtschaftliches-produktionspotenzial-fruehjahrsprojektion-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2023): Verwaltungsvereinbarung Städtebauförderung 2023 / 2024. https://www.staedtebaufoerderung.info/DE/Grundlagen/RechtlicheGrundlagen/rechtlichegrundlagen_node.html.

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen, Berlin. https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf.

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

Burke, M., Hsiang, S. M. & Miguel, E. (2015): Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production. *Nature* 527 (7577), S. 235–239. DOI: 10.1038/nature15725.

Burret, H., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S., Spillmann, T., Ambros, J., Limbers, J., Brutsche, A., Granzow, M. & Häßler, R. D. (2021): Beitrag von Green Finance zum Erreichen von Klimaneutralität in Deutschland – Studie. Unter Mitarbeit von NKI – Institut für nachhaltige Kapitalanlagen und Nextra Consulting. Hg. v. Prognos AG, Basel.

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>.

Bux, K. (2006): Klima am Arbeitsplatz – Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse - Bedarfsanalyse für weitere Forschungen. Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Berlin, Dresden, abgerufen am 26.10.2023.

Campagnolo, L., Cian, E. de, Pavanello, F., Falchetta, G., Colelli, F., Mansi, G. A., Bigano, A., Parrado, R., Frassetto & Erica (2023): The cost of climate change on households and families in the EU. <https://www.eesc.europa.eu/sites/default/files/files/qe-04-23-897-en-n.pdf>, abgerufen am 28.11.2023.

Castells-Quintana, D. & McDermott, T. K. J. (2023): Inequality and Climate Change: The Within-Countries Distributional Effects of Global Warming. SSRN Journal. DOI: 10.2139/ssrn.4357764.

Chang, B., Kang, S. J. & Jung, T. Y. (2019): Price and Output Elasticities of Energy Demand for Industrial Sectors in OECD Countries. Sustainability 11 (6). DOI: 10.3390/su11061786.

Climate Action Tracker (2022): Warming Projections Global Update – Massive gas expansion risks overtaking positive climate policies.

Climate Policy initiative (CPI) (2022): Global Landscape of Climate Finance: A Decade of Data. <https://www.climatepolicyinitiative.org/publication/global-landscape-of-climate-finance-a-decade-of-data/>.

Colmenares, G., Löschel, A. & Madlener, R. (2020): The rebound effect representation in climate and energy models. Environmental Research Letters 15 (12), S. 123010. DOI: 10.1088/1748-9326/abc214.

Contargo GmbH & CO. KG (Hg.) (2017): Klein Wasser – ... ein wichtiges Thema für Contargo und ihre Kunden. Hier finden Sie die nötigen Informationen., Duisburg, abgerufen am 22.05.2023.

de Bandt, O., Jacolin, L. & Thibault, L. (2021): Climate Change in Developing Countries: Global Warming Effects, Transmission Channels and Adaptation Policies. Banque de France. Banque de France Working Paper 822. DOI: 10.2139/ssrn.3888112.

Dee, L. E., Miller, S. J., Peavey, L. E., Bradley, D., Gentry, R. R., Startz, R., Gaines, S. D. & Lester, S. E. (2016): Functional diversity of catch mitigates negative effects of temperature variability on fisheries yields. *Proceedings. Biological sciences* 283 (1836). DOI: 10.1098/rspb.2016.1435.

Dehnhardt, A., Hirschfeld, J., Drünkler, D., Peschow, U., Engel, H. & Hammer, M. (2008): Kosten-Nutzen-Analyse von Hochwasserschutzmaßnahmen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3631.pdf>, abgerufen am 28.11.2023.

Dehnhardt, A., Welling, M., Salecki, S. & Wagner, J. (2020): Kosten und Nutzen von grünen Klimaanpassungsmaßnahmen in Bremen – Kosten-Nutzen-Analysen als Entscheidungshilfe für Politik und Verwaltung. https://www.ioew.de/publikation/kosten_und_nutzen_von_gruenen_klimaanpassungsmassnahmen_in_bremen, abgerufen am 28.11.2023.

Dell, M., Jones, B. F. & Olken, B. A. (2009): Temperature and Income: Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates. *The American Economic Review* 99 (2), S. 198–204. DOI: 10.1257/aer.99.2.198.

Deutsche Bundesbank (2023): Vermögen und Finanzen privater Haushalte in Deutschland – Ergebnisse der Vermögensbefragung 2021. Deutsche Bundesbank Monatsbericht April 2023, 75. Jahrgang, Nr. 4.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Berlin.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2023): Klimaprojektionen. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/klimaprojektionen_node.html, abgerufen am 28.03.2024.

Diaz, D. B. (2016): Estimating global damages from sea level rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM). *Climatic Change* 137, S. 143–156. DOI: 10.1007/s10584-016-1675-4.

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

Donmez, C., Schmidt, M., Cilek, A., Grosse, M., Paul, C., Hierold, W. & Helming, K. (2023): Climate change impacts on long-term field experiments in Germany. *Agricultural Systems* 205, S. 103578. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103578.

Dunne, J. P., Stouffer, R. J. & John, J. G. (2013): Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change* 3 (6), S. 563–566. DOI: 10.1038/nclimate1827.

Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., Dear, R. de, Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R. S., Ma, W., Malik, A., Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J. & Jay, O. (2021): Hot weather and heat extremes: health risks. *Lancet (London, England)* 398 (10301), S. 698–708. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)01208-3.

Egerer, S., Puente, A. F., Peichl, M., Rakovec, O., Samaniego, L. & Schneider, U. A. (2023): Limited potential of irrigation to prevent potato yield losses in Germany under

climate change. *Agricultural Systems* 207 (103633), S. 1–13. DOI: 10.1016/j.agsy.2023.103633.

Er-Kara, M., Ghadge, A. & Bititci, U. S. (2020): Modelling the impact of climate change risk on supply chain performance. *International Journal of Production Research* 24. DOI: 10.1080/00207543.2020.1849844.

ESKP (2024): Biodiversität und Artenvielfalt. <https://www.eskp.de/grundlagen/klimawandel/biodiversitaet-artenvielfalt-935291/>, zuletzt aktualisiert am 15.07.2024.

Espagne, E., Oman, W., Mercure, J.-F., Svartzman, R., Volz, U., Pollitt, H., Semieniuk, G. & Campiglio, E. (2023): Cross-Border Risks of a Global Economy in Mid-Transition. *International Monetary Fund. IMF Working Papers* 2023/184, Washington D.C.

Eurofound (2023): Fit for 55 climate package – Impact on EU employment by 2030.

Europäische Kommission (2017): Climate mainstreaming in the EU budget - Preparing for the next MFF – Final report. <https://trinomics.eu/wp-content/uploads/2018/07/Climate-mainstreaming-in-the-EU-Budget-preparing-for-the-next-MFF.pdf>.

Europäische Kommission (2018): A Clean Planet for all – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. In-depth analysis in support of the commission communication COM (2018) 773.

European Central Bank (ECB) (2023): Economic, financial and monetary developments. *ECB Economic Bulletin* 6/2023.

European Commission (Hg.) (2023): 2024 Ageing Report – Underlying Assumptions and Projection Methodologies. *European Economy Institutional Papers* 257, Luxembourg.

European Commission (EC) (2020): Stepping up Europe's 2030 climate ambition – Investing in a climate-neutral future for the benefits of our people.

European Commission (EC) (2021): Forging a climate-resilient Europe – The new EU Strategy on Adaptation to Climate Change. Impact assessment report. European Commission (EC), Brüssel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2021%3A82%3AFIN#document1>, abgerufen am 20.02.2024.

Felipe, J. & McCombie, J. S. L. (2013): *The Aggregate Production Function and the Measurement of Technical Change – 'Not Even Wrong'*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, Northampton, Massachusetts.

Ferguson, C., Andandarajah, G., Butnar, I., Calzadilla, A. & Dessens, O. (2020): *Costing the Earth – Climate Damage Costs and GDP – A summary of report produced by UCL Energy Institute for CDP*. Hg. v. UCL Energy Institute for CDP, London, abgerufen am 22.05.2023.

Flaute, M., Reuschel, S. & Stöver, B. (2022): *Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel: Szenarioanalyse bis 2050 – Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland*. GWS Research Report 2022/02, Osnabrück.

Fliß, R., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kopp, B., Neumann, J. & Posselt, M. (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die Wasserversorgung in Süddeutschland. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (Grundwasser)* 26, 2021 (26), S. 33–45. DOI: 10.1007/s00767-021-00477-z.

Fragkiadakis, K., Fragkiadakis, D., Fragkos, P., Paroussos, L., Gorenstein Dedecca, J., Guevara Opinska, L., Petsinaris, F., Molnar, B., Lewney, R. & Kiss-Dobronyi, B. (2022): The impact of the clean energy transition on the determinants of economic growth.

Fraunhofer ISI, ifeu, IREES, Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, Öko-Institut & Prognos AG (2022): Einzelmaßnahmenbewertung des Klimaschutzsofortprogramms der Bundesregierung 2022 – Bericht im Rahmen der wissenschaftlichen Unterstützung Klimapolitik und Maßnahmenprogramm 2018.

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.

Froehlich, H. E., Gentry, R. R. & Halpern, B. S. (2018): Global change in marine aquaculture production potential under climate change. *Nature ecology & evolution* 2 (11), S. 1745–1750. DOI: 10.1038/s41559-018-0669-1.

Gao, J., Peng, B. & Smyth, R. (2020): On income and price elasticities for energy demand: A panel data study. 28/20. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105168.

García-León, D., Casanueva, A., Standardi, G., Burgstall, A., Flouris, A. D. & Nybo, L. (2021): Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe. *Nature communications* 12 (1), S. 1–10. DOI: 10.1038/s41467-021-26050-z.

Gemeinschaftsdiagnose (2023): Kaufkraft kehrt zurück – politische Unsicherheit hoch – Kurzfassung der Gemeinschaftsdiagnose Herbst 2023. Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose. Hg. v. Ifo Institut. ifo Schnelldienst 10/2023. <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2023-10-projektgruppe-gemeinschaftsdiagnose-kurzfassung-herbst-2023.pdf>, abgerufen am 15.02.2024.

Guerrien, B. & Gun, O. (2015): Putting an end to the aggregate function of production... forever? *Real-World Economics Review* 73, S. 99–109. <https://www.paecon.net/PAERReview/issue73/whole73.pdf>.

Handelsblatt Research Institute (HRI) (2024): Das Billionenprojekt. *Handelsblatt*, 08.01.2024 (5), S. 4–5.

Hänsel, S., Hillebrand, G., Nilson, E., Rauthe, M., Lohrengel, A.-F., Meine, L., Herrmann, C., Brendel, C., Forbriger, M., Kirsten, J., Klose, M., Ork, J. P., Patzwahl, R. & Schade, N. (2020): Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Experten Netzwerks. DOI: 10.5675/EXPNHS2020.2020.03.

Harthan, R., Förster, H., Borkowski, K., Böttcher, H., Braungardt, S., Bürger, V., Emele, L., Görz, W. K., Hennenberg, K., Jansen, L. L., Jörß, W., Kasten, P., Loreck, C., Ludig, S., Matthes, F., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Nissen, C., Repenning, J., Scheffler, M., Steinbach, I., bei der Wieden, M., Wiegmann, K., Brugger, H., Fleiter, T., Mandel, T., Rehfeldt, M., Rohde, C., Yu, S., Steinbach, J., Deurer, J., Fuß, R., Rock, J., Osterburg, B., Rüter, S., Adam, S., Dunger, K., Rösemann, C., Stümer, W., Tiemeyer, B. & Vos, C. (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. Im Auftrag des UBA. Hg. v. Umweltbundesamt. Climate Change 39.

Hattermann, F. F., Post, J., Krysanova, V., Conradt, T. & Wechsung, F. (2008): Assessment of Water Availability in a Central- European River Basin (Elbe) Under Climate Change. *Advances in Climate Change Research* (4), S. 42–50, abgerufen am 22.05.2023.

Havik, K., Mc Morrow, K., Orlandi, F., Planas, C., Raciborski, R., Röger, W., Rossi, A., Thum-Thysen, A. & Vandermeulen, V. (2014): The Production Function Methodology for Calculating Potential Growth Rates & Output Gaps. European Commission. *Economic Papers* 535, Brüssel.

Henseler, M. & Schumacher, I. (2019): The impact of weather on economic growth and its production factors. *Climatic Change* 154, S. 417–433. DOI: 10.1007/s10584-019-02441-6.

Hinterlang, N., Martin, A., Röhe, O., Stähler, N. & Strobel, J. (2023): Technical Paper – The Environmental Multi-Sector DSGE model EMuSe: A technical documentation. Deutsche Bundesbank. 2023/03, Frankfurt am Main.

Hirschfeld, J., Schulze, N., Hock, A.-L., Trenczek, J., Flaute, M., Eiserbeck, L., Sandhövel, M., Reuschel, S., Lühr, O., Hoffmann, E. & Dehnhardt, A. (2021): 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.

Howarth, C. & Robinson, E. J. Z. (2024): Effective climate action must integrate climate adaptation and mitigation. *Nature Clim Change* 14 (4), S. 300–301. DOI: 10.1038/s41558-024-01963-x.

Hsiang, S., Kopp, R., Jina, A., Rising, J., Delgado, M., Mohan, S., Rasmussen, D. J., Muir-Wood, R., Wilson, P., Oppenheimer, M., Larsen, K. & Houser, T. (2017): Estimating economic damage from climate change in the United States – Economics. *Science* (New York, N.Y.) 356 (6345), S. 1362–1369. DOI: 10.1126/science.aal4369.

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, abgerufen am 10.04.2024.

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.

Hudson, P., Botzen, W. W. & Aerts, J. C. (2019): Flood insurance arrangements in the European Union for future flood risk under climate and socioeconomic change. *Global Environmental Change* 58, S. 101966. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2019.101966.

Institut der deutschen Wirtschaft (IW) (2022): Klimaschutzinvestitionen – Begriffsbestimmung und Datengrundlage. Unter Mitarbeit von Sarah Fluchs, Adriana Neligan und Finn Wendland. <https://www.iwkoeln.de/studien/sarah-fluchs-adriana-neligan-finn-arnd-wendland-klimaschutzinvestitionen-eine-bestandsaufnahme.html>, abgerufen am 20.09.2023.

Intergovernmental Panel on Climate Change (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.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.) (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Priyadarshi R. Shukla, Jim Skea, Raphael Slade, Alaa Al Khourdajie, Renée van Diemen, David McCollum et al. Cambridge University Press, Cambridge, New York.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023a): Climate Change 2023: Synthesis Report – Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. Hoesung Lee und Jose Manuel Romero. IPCC. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023b): Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report – Summary for Policymakers. https://report.ipcc.ch/ar6syrr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf, abgerufen am 30.03.2023.

International Energy Agency (IEA) (2013): Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency, France.

International Energy Agency (IEA) (Hg.) (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. 4. Aufl., France.

International Energy Agency (IEA) (2023): World Energy Outlook 2023. International Energy Agency, Paris, France. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6e592d82-b8c4-4521-8d14-71886b2ecfb8/WorldEnergyOutlook2023.pdf>, abgerufen am 26.10.2023.

International Labour Organization (ILO) (Hg.) (2019): Working on a warmer planet – The impact of heat stress on labour productivity and decent work. Unter Mitarbeit von Adam Adrien-Kirby, Antonia Asenjo, Floriana Borino, Kazutoshi Chatani, Ryszard Cholewinski, Marva Corley-Coulibaly et al., Geneva, abgerufen am 01.11.2023.

International Monetary Fund (IMF) (2023): Fiscal Monitor – Climate Crossroads: Fiscal Policies in a Warming World, Washington D.C.

International Organization for Standardization (Hg.) (2021): ISO 14091:2021 – Adaptation to climate change — Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. <https://www.iso.org/standard/68508.html>, abgerufen am 15.07.2024.

Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A. C., Elliott, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J. A., Fuchs, K., Guarin, J. R., Heinke, J., Hoogenboom, G., Iizumi, T., Jain, A. K., Kelly, D., Khabarov, N., Lange, S., Lin, T.-S., Liu, W., Mialyk, O., Minoli, S., Moyer, E. J., Okada, M., Phillips, M., Porter, C., Rabin, S. S., Scheer, C., Schneider, J. M., Schyns, J. F., Skalsky, R., Smerald, A., Stella, T., Stephens, H., Webber, H., Zabel, F. & Rosenzweig, C. (2021): Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature food* 2 (11), S. 873–885. DOI: 10.1038/s43016-021-00400-y.

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., Jochemsen, 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. & Schauser, I. (2021b): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Kurzfassung. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 26/2021.

Kahn, M. E., Mohaddes, K., Ng, R. N., Pesaran, M. H., Raissi, M. & Yang, J.-C. (2021): Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis. *Energy Economics* 104, S. 105624. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105624.

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.

Kemfert, C. (2007): Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden. Hg. v. DIW. *Wochenbericht* 11/2007, Berlin.

Kemmler, A., Kirchner, A., auf der Maur, A., Ess, F., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T., Straßburg, S., Wunsch, M., Ziegenhagen, I., Schlomann, B., Plötz, P., Lutz, C., Becker, L. & Fritsche, U. (2021): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 – Gesamtdokumentation der Szenarien. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2021/energiewirtschaftliche-projektionen-und-folgeabschaetzungen-2030-2050.pdf>, abgerufen am 25.11.2022.

Kjellstrom, T. (2016): Impact of Climate Conditions on Occupational Health and Related Economic Losses: A New Feature of Global and Urban Health in the Context of Climate Change. *Asia-Pacific journal of public health* 28 (2 Suppl), 28S-37S. DOI: 10.1177/1010539514568711.

- Kjellstrom, T., Briggs, D., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M. & Hyatt, O. (2016): Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts. *Annual review of public health* 37, S. 97–112. DOI: 10.1146/annurev-publhealth-032315-021740.
- Kjellstrom, T., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M. & Briggs, D. (2018): Estimating population heat exposure and impacts on working people in conjunction with climate change. *International journal of biometeorology* 62 (3), S. 291–306. DOI: 10.1007/s00484-017-1407-0.
- 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, S. 251–269. DOI: 10.1007/s10584-020-02661-1.
- Köberle, A. C., Vandyck, T., Guivarch, C., Macaluso, N., Bosetti, V., Gambhir, A., Tavoni, M. & Rogelj, J. (2021): The cost of mitigation revisited. *Nature Climate Change* 11, S. 1035–1045. DOI: 10.1038/s41558-021-01203-6.
- Kopernikus Projekt Ariadne (Hg.) (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Ariadne-Report. file:///C:/Users/Hembach-Stunden/Downloads/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_corr0222.pdf, abgerufen am 27.01.2023.
- Köppl, A. & Schratzenstaller, M. (2023): Carbon taxation: A review of the empirical literature. *Journal of Economic Surveys* 37, S. 1353–1388. DOI: 10.1111/joes.12531.
- Kotz, M., Kuik, F., Lis, E. & Nickel, C. (2024a): Global warming and heat extremes to enhance inflationary pressures. *Communications Earth & Environment* 5. DOI: 10.1038/s43247-023-01173-x.
- Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. (2024b): The economic commitment of climate change. *Nature* 628 (8008), S. 551–557. DOI: 10.1038/s41586-024-07219-0.
- Labandeira, X., Labeaga, J. M. & López-Otero, X. (2017): A meta-analysis on the price elasticity of energy demand. *Energy Policy* 102, S. 549–568. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.01.002.
- Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2023): Landesregierung Nordrhein-Westfalen geht mit Programm für kommunale Altschulden in Vorleistung - zudem 6-Milliarden-Investitionsprogramm für kommunale Infrastruktur mit Fokus auf Klimaschutz und Klimaanpassung. <https://www.land.nrw/pressemitteilung/landesregierung-nordrhein-westfalen-geht-mit-programm-fuer-kommunale-altschulden>.
- 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.

Lantz, V., McMonagle, G., Hennigar, C., Sharma, C., Withey, P. & Ochuodho, T. (2022): Forest succession, management and the economy under a changing climate: Coupling economic and forest management models to assess impacts and adaptation options. *Forest Policy and Economics* 142, S. 102781. DOI: 10.1016/j.for-pol.2022.102781.

Lehr, U., Banning, M., Edler, D. & Flaute, M. (2020a): Analyse der deutschen Exporte und Importe von Technologiegütern zur Nutzung erneuerbarer Energien und anderer Energietechnologiegüter – Endbericht. GWS Research Report 2020/02, Osnabrück. <https://papers.gws-os.com/gws-researchreport20-2.pdf>.

Lehr, U., Flaute, M., Ahmann, L., Nieters, A., Hirschfeld, J., Welling, M., Wolff, C., Gall, A., Kersting, J., Mahlbacher, M. & Möllendorff, C. von (2020b): 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., Lutz, C. & Edler, D. (2012): Green jobs? Economic impacts of renewable energy in Germany. *Energy Policy* 47, S. 358–364. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.076.

Lehr, U., Nieters, A. & Drosdowski, T. (2016): Extreme Weather Events and the German Economy – The Potential for Climate Change Adaptation. In: Leal Filho, W., Musa, H., Cavan, G., O'Hare, P. & Seixas, J. (Hg.): *Climate Change Adaptation, Resilience and Hazards*. *Climate Change Management*. Springer International Publishing, Cham, S. 125–141.

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.

Limaye, V. S., Max, W., Constible, J. & Knowlton, K. (2019): Estimating the Health-Related Costs of 10 Climate-Sensitive U.S. Events During 2012. *GeoHealth* 3 (9), S. 245–265. DOI: 10.1029/2019GH000202.

Lutz, B. J., Massier, P., Sommerfeld, K. & Löschel, A. (2017): Drivers of Energy Efficiency in German Manufacturing: A Firm-level Stochastic Frontier Analysis.

Lutz, C., Banning, M., Ahmann, L. & Flaute, M. (2021a): Energy efficiency and rebound effects in German industry – evidence from macroeconomic modeling. *Economic Systems Research* 34 (3), S. 1–20. DOI: 10.1080/09535314.2021.1937953.

Lutz, C., Becker, L. & Kemmler, A. (2021b): Socioeconomic Effects of Ambitious Climate Mitigation Policies in Germany. *Sustainability* 13 (11), S. 6247. DOI: 10.3390/su13116247.

Lutz, C., Becker, L., Ulrich, P. & Distelkamp, M. (2019): Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland – Teilbericht des Vorhabens „Politikinstrumente zur Klimaanpassung. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 25/2019. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/soziooekonomische-szenarien-als-grundlage-der>, abgerufen am 06.12.2021.

Lutz, C. & Breitschopf, B. (2016): Systematisierung der gesamtwirtschaftlichen Effekte und Verteilungswirkungen der Energiewende. GWS Research Report 2016/1, Osnabrück. <http://papers.gws-os.com/gws-researchreport16-1.pdf>.

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 2018/4, Osnabrück. <http://papers.gws-os.com/gws-researchreport18-4.pdf>.

Malhi, G. S., Kaur, M. & Kaushik, P. (2021): Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability* 13 (3), S. 1318. DOI: 10.3390/su13031318.

Mercure, J.-F., Knobloch, F., Pollitt, H., Paroussos, L., Scricciu, S. S. & Lewney, R. (2019): Modelling innovation and the macroeconomics of low-carbon transitions: theory, perspectives and practical use. *Climate Policy* 19 (8), S. 1019–1037. DOI: 10.1080/14693062.2019.1617665.

Metcalf, G. E. & Stock, J. H. (2023): The Macroeconomic Impact of Europe's Carbon Taxes. *American Economic Journal: Macroeconomics* 15 (3), S. 265–286.

Moore, F. C. & Lobell, D. B. (2014): Adaptation potential of European agriculture in response to climate change. *Nature Clim Change* 4 (7), S. 610–614. DOI: 10.1038/nclimate2228.

National Centre for Climate Services (NCCS) (Hg.) (2021): Was bedeutet Klimaschutz? <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/grundlagen-zum-klima/was-bedeutet-klimaschutz-.html>.

Network for Greening the Financial System (NGFS) (2022): NGFS Scenarios for central banks and supervisors. Unter Mitarbeit von Potsdam Institute for Climate Impact Research PIK, International Institute for Applied Systems Analysis, University of Maryland (UMD), Climate Analytics (CA) und National Institute of Economic and Social Research (NIESR), France.

Network for Greening the Financial System (NGFS) (2023a): Conceptual note on short-term climate scenarios – Technical document, Paris.

Network for Greening the Financial System (NGFS) (2023b): NGFS Climate Scenarios – Technical Dokumentation. 4.2. Aufl.

Newman, R. & Noy, I. (2022): The Global Costs of Extreme Weather That Are Attributable to Climate Change. CESifo Working Paper (10053). https://www.econstor.eu/bitstream/10419/267286/1/cesifo1_wp10053.pdf, abgerufen am 09.06.2023.

Nikas, A., Doukas, H. & Papandreou, A. (2019): A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models. In: Doukas, H., Flamos, A. & Lieu, J. (Hg.): Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, S. 1–54.

Nilson, E., Astor, B., Fischer, H., Fleischer, C., Haunert, 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 Schifffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Unter Mitarbeit von Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Deutscher Wetterdienst (DWD). Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Koblenz. DOI: 10.5675/ExpNNE2020.2020.07.

Nilson, E., Krahe, P., Klein, B., Lingemann, I., Horsten, T., Carambia, M., Larina, M. & Maurer, T. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland – Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, abgerufen am 01.11.2023. DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01.

Nordhaus, W. D. (1992): An optimal transition path for controlling greenhouse gases. Science 258. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/nordhaus-lecture.pdf>.

OECD (2021a): Assessing the Economic Impacts of Environmental Policies – Evidence from a Decade of OECD Research. <https://doi.org/10.1787/bf2fb156-en>.

OECD (2021b): Managing Climate Risks, Facing up to Losses and Damages. Hg. v. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/55ea1cc9-en>.

Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G. & Lobell, D. B. (2021): Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. Nature Clim Change 11 (4), S. 306–312. DOI: 10.1038/s41558-021-01000-1.

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.

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.

PIK (2021): Kritikalität von regionalen Wettermustern: gestern, heute & zukünftig. <https://www.pik-potsdam.de/~peterh/db2020/tab/>, zuletzt aktualisiert am 02.06.2021, abgerufen am 08.07.2024.

Posthumus, H., Deeks, L. K., Rickson, R. E. & Quinton, J. N. (2015): Costs and benefits of erosion control measures in the UK. *Soil Use and Management* 31 (S1), S. 16–33. DOI: 10.1111/sum.12057.

Prognos (2021): Prognos Economic Outlook (PEO®) – Perspektiven & Prognosen für 42 Länder bis 2040. Hg. v. Prognos.

Prognos (2022): Beitrag von Green Finance zum Erreichen von Klimaneutralität – Öffentlicher Anteil an Klimaschutzinvestitionen. Kurzstudie im Auftrag der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW).

Prognos (2023): Energieeffizienz für eine klimaneutrale Zukunft 2045 – Roadmap Energieeffizienz. Im Auftrag des BMWK. <https://www.prognos.com/de/projekt/roadmap-energieeffizienz-2045>.

Prognos (2024): Klimaschutzinvestitionen für die Transformation des Energiesystems nach Sektoren und Anwendungen. Im Auftrag des BMWK (unveröffentlicht). Hg. v. Prognos.

Prognos, GWS, Fraunhofer ISI & IINAS (2021): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 – Gesamtdokumentation der Szenarien. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Randazzo, T., Cian, E. de & Mistry, M. N. (2020): Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries. *Economic Modelling* 90, S. 273–287. DOI: 10.1016/j.econmod.2020.05.001.

Reilly, J., Hohmann, N. & Kane, S. (1994): Climate change and agricultural trade: Who benefits, who loses? *Climate environmental change-human and Policy Dimensions* 4 (1), S. 24–36. DOI: 10.1016/0959-3780(94)90019-1.

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.

Reuschel, S. & Stöver, B. (2024): Health-related costs of climate change in Germany. GWS Discussion Paper 2024/3, Osnabrück. <https://papers.gws-os.com/gws-paper24-3.pdf>.

Roson, R. & Damania, R. (2017): The macroeconomic impact of future water scarcity: An assessment of alternativ scenarios. *Journal of Policy Modeling* 39 (6), S. 1141–1162. DOI: 10.1016/j.jpolmod.2017.10.003.

Rüttinger, L., van Ackern, P., Lepold, T., Vogt, R. & Auberger, A. (2020): Impacts of climate change on mining, related environmental risks and raw material supply. Final report. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; adelphi research gGmbH. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_106-2020_impacts_of_climate_change_on_mining_related_environmental_risks_and_raw_material_supply.pdf, abgerufen am 22.05.2023.

Sachverständigenrat (2023): Wachstumsschwäche überwinden - In die Zukunft investieren. Unter Mitarbeit von Veronika Grimm, Ulrike Malmendier, Monika Schnitzer, Achim Truger und Martin Werding. Hg. v. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (Sachverständigenrat). Jahresgutachten, Paderborn. https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/jg202324/JG202324_Gesamtausgabe.pdf.

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.

Schmuker, C. (2021): Klimawandel: Extremtemperaturen gefährden die Gesundheit. Hg. v. Wissenschaftliches Institut der AOK (WIdO). *G+G Wissenschaft* 21(3). <https://www.wido.de/publikationen-produkte/ggw-gesundheit-gesellschaft-wissenschaft/ausgabe-3-2021/>, abgerufen am 22.05.2023.

Schneemann, C., Zenk, J., Zika, G., Kalinowski, M., Krebs, B., Maier, T., Bernardt, F., Krinitz, J., Mönnig, A., Parton, F., Ulrich, P. & Wolter, M. (2023): Langfristprojektion des Fachkräftebedarfs in Deutschland, 2021–2040. Szenario „Fortschrittliche Arbeitswelt“ (Annahmensetzung nach dem Koalitionsvertrag von 2021). BMAS Forschungsbericht 617, Berlin.

Schneller, A., Kahlenborn, W., Töpfer, K., Thürmer, A., Wunderlich, C., Fiedler, S., Schrems, I., Ekardt, F., Lutz, C., Großmann, A., Schmidt-De Caluwe, R., Deinert, O. & Neumann, W. (2020): Sozialverträglicher Klimaschutz – Sozialverträgliche Gestaltung von Klimaschutz und Energiewende in Haushalten mit geringem Einkommen. UBA-Texte 66/2020. https://downloads.gws-os.com/texte_2020_66_sozialvertraeglicher_klimaschutz_final.pdf.

Sievers, L., Grimm, A., Siegle, J., Fahl, U., Kaiser, M., Pietzcker, R. & Rehfeldt, M. (2023): Gesamtwirtschaftliche Wirkung der Energiewende – modellbasierte Analyse möglicher Transformationspfade hin zu Klimaneutralität. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

Statistisches Bundesamt (StBA) (2019): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – Ergebnisse der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung – Hauptvarianten 1 bis 9 – . Statistisches Bundesamt (StBA).

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

Statistisches Bundesamt (StBA) (2024a): Statistischer Bericht. Umweltökonomische Gesamtrechnungen im Überblick. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (StBA) (2024b): Umwelt. Sachinvestitionen in Maßnahmen für den Klimaschutz. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/_Grafik/_Interaktiv/umweltschutzinvestitionen-klimaschutz.html.

Statistisches Bundesamt (StBA) (2024c): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Bruttoanlageinvestitionen. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/Irvgr03.html#242548>, abgerufen am 10.07.2024.

Stern, N. H. (2007): The economics of climate change – The Stern review. 30. Aufl. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

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. GWS Research Report 2022/01, Osnabrück. <http://papers.gws-os.com/gws-researchreport22-1.pdf>.

Szewczyk, W., Mongelli, I. & Ciscar, J.-C. (2021): Heat stress, labour productivity and adaptation in Europe—a regional and occupational analysis. *Environmental Research Letters* 16 (10), S. 105002. DOI: 10.1088/1748-9326/ac24cf.

Takakura, J., Fujimori, S., Takahashi, K., Hijioka, Y., Hasegawa, T., Honda, Y. & Masui, T. (2017): Cost of preventing workplace heat-related illness through worker breaks and the benefit of climate-change mitigation. *Environmental Research Letters* 12 (6), S. 64010. DOI: 10.1088/1748-9326/aa72cc.

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.

Tilman, D. (2001): Functional Diversity. *Encyclopedia of Biodiversity*, 3, S. 109–120. DOI: 10.1016/B0-12-226865-2/00132-2.

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“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_Klimawandelfolgen-Deutschland_%C3%9Cbersicht%20vergangener%20Extremwetter-sch%C3%A4den_AP2_1.pdf, abgerufen am 10.04.2024.

Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L., Sandhövel, M. & Ibens, D. (2022c): Auswahlprozess zur Detailuntersuchung eines klimawandelbezogenen Extremereignisses – Methodisches Konzept und Anwendung. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“. Hg. v. Prognos AG, Düsseldorf. https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_%20Auswahl_Untersuchungsereignisse_AP2_2.pdf.

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.

Umweltbundesamt (UBA) (2022): Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990–2020. 1990–2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/co2_ef_liste_2022_brennstoffe_und_industrie_final.xlsx, abgerufen am 15.02.2024.

Umweltbundesamt (UBA) (2023a): Anpassung auf Länderebene und in Handlungsfeldern, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene>.

Umweltbundesamt (UBA) (2023b): Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990–2022. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023_03_15_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_pm.xlsx, abgerufen am 24.07.2024.

Umweltbundesamt (UBA) (2024a): Sozio-ökonomische Folgenabschätzung zum Projektionsbericht 2023. Climate Change 17/24. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sozio-oekonomische-folgenabschaetzung>.

Umweltbundesamt (UBA) (2024b): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>, abgerufen am 15.02.2024.

Umweltbundesamt (UBA) (2024c): Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt. Treibhausgas-Projektionen für Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11740/publikationen/thg-projektionen_2024_ergebnisse_kompakt.pdf, abgerufen am 19.03.2024.

United Nations Environment Programme (2022): Adaptation Gap Report 2022. <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2022>.

Vogel, E., Donat, M. G., Alexander, L. V., Meinshausen, M., Ray, D. K., Karoly, D., Meinshausen, N. & Frieler, K. (2019): The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters* 14 (5). DOI: 10.1088/1748-9326/ab154b.

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. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_4_cluster_infrastruktur_bf_211027_0.pdf, abgerufen am 10.04.2024.

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.

Watkiss, P. (2022): The Costs of Adaptation and the Economic Costs and Benefits of Adaptation in the UK, Policy Paper. <https://www.theccc.org.uk/publication/the-costs-of-adaptation-and-the-economic-costs-and-benefits-of-adaptation-in-the-uk-paul-watkiss/>.

Watkiss, P., Cimato, F. & Hunt, A. (2021): Monetary Valuation of Risks and Opportunities in CCRA3 – Monetary Valuation of Risks and Opportunities in CCRA3 Report to the Climate Change Committee as part of the UK Climate Change Risk Assessment 3. Hg. v. Paul Watkiss Associates, London.

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.

Winne, J. de & Peersman, G. (2021): The adverse consequences of global harvest and weather disruptions on economic activity. Nature Clim Change 11 (8), S. 665–672. DOI: 10.1038/s41558-021-01102-w.

Wolf, M., Ölmez, C., Schöntaler, K., Porst, L., Voß, M., Linsenmeier, M., Kahlenborn, W., Dorsch, L. & Dudda, L. (2021a): 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.

Wolf, M., Ölmez, C., Schöthaler, K., Porst, L., Voß, M., Linsenmeier, M., Kahlenborn, W., Dorsch, L. & Dudda, L. (2021b): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 5: Risiken und Anpassung in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit. Hg. v. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_5_cluster_wirtschaft_gesundheit_bf_211027_0.pdf.

Wolter, M. I., Bernardt, F., Daßler, J., Reuschel, S. & Stöver, B. (2024): Klimafolgen und Anpassung – 2024. Aus den Arbeiten zur Basisprojektion des INFORGE-Modells 2024. Hg. v. GWS mbH Osnabrück. GWS Research Report 2024/02, Osnabrück. <https://papers.gws-os.com/gws-researchreport24-2.pdf>.

You, L., Rosegrant, M. W., Wood, S. & Sun, D. (2009): Impact of growing season temperature on wheat productivity in China. Agricultural and Forest Meteorology 149 (6-7), S. 1009–1014. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.12.004.

Zander, K. K., Botzen, W. J. W., Oppermann, E., Kjellstrom, T. & Garnett, S. T. (2015): Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change* 5 (7), S. 647–651. DOI: 10.1038/nclimate2623.

Zika, G., Hummel, M., Schneemann, C., Studtrucker, M., Kalinowski, M., Maier, T., Krebs, B., Steeg, S., Bernardt, F., Krinitz, J., Mönnig, A., Parton, F., Ulrich, P. & Wolter, M. I. (2021): Die Auswirkungen der Klimaschutzmaßnahmen auf den Arbeitsmarkt und die Wirtschaft. *Forschungsbericht* 526/5.

Zika, G., Maier, T., Mönnig, A., Schneemann, C., Steeg, S., Weber, E., Wolter, M. I. & Krinitz, J. (2022): Die Folgen der neuen Klima- und Wohnungsbaupolitik für Wirtschaft und Arbeitsmarkt. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung. IAB-Forschungsbericht 03/2022, Nürnberg. <https://doku.iab.de/forschungsbericht/2022/fb0322.pdf>, abgerufen am 22.12.2022.

Zika, G., Schneemann, C., Zenk, J., Maier, T., Kalinowski, M., Schnur, A., Krinitz, J., Mönnig, A. & Wolter, M. I. (2023): Fachkräftemonitoring für das BMAS – Mittelfristprognose bis 2027. *Forschungsbericht* 625.

Zou, X., Li, Y., Cremades, R., Gao, Q., Wan, Y. & Qin, X. (2013): Cost-effectiveness analysis of water-saving irrigation technologies based on climate change response: A case study of China. *Agricultural Water Management* 129, S. 9–20. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.07.004.